MARZO 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

GENETICA
La necesidad de redefinir el gen

CUANTICA
Efectos del vacío en la materia

NEUROCIENCIA
¿Cómo nos engañan magos e ilusionistas?

EVOLUCION
Vuelo y ecolocación de los murciélagos

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

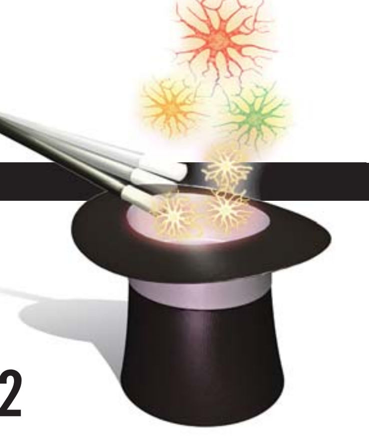
ENCELADO

Esta luna helada de Saturno tiene géiseres activos y quizás un mar oculto que podría albergar vida



SUMARIO

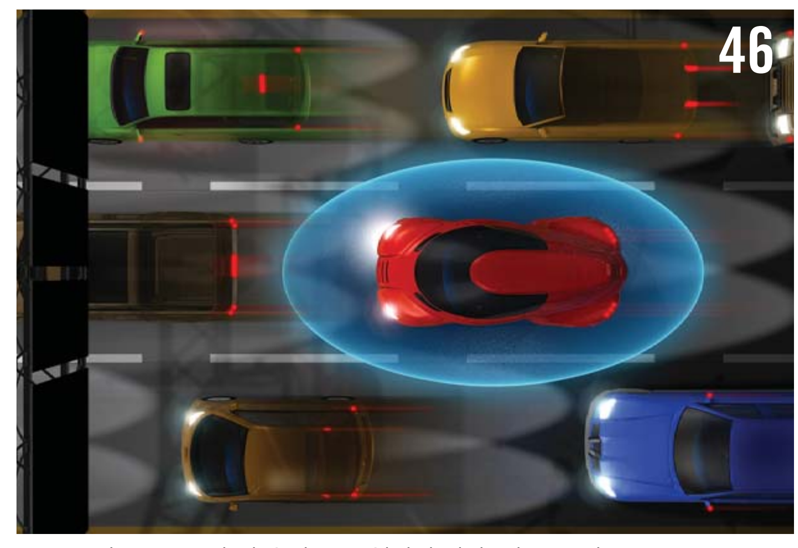
Marzo de 2009/ Número 390



Los trucos de magia revelan su eficacia en el dominio de la neurociencia.



Definir un buen sistema de clasificación resulta esencial para el desarrollo de cualquier disciplina.



Ya se puede crear una burbuja de seguridad alrededor de un coche.



El APN se considera un posible candidato para la creación de vida artificial.

ARTICULOS

ASTRONOMIA

14 Encélado

Carolyn Porco

Los paisajes rugosos y los surtidores de la sexta mayor luna de Saturno avalan una posible presencia de aguas subterráneas.

BIOTECNOLOGIA

24 Una nueva biomolécula

Peter E. Nielsen

El ácido peptidonucleico, híbrido sintético de proteína y ADN, podría constituir la base de un nuevo tipo de fármacos y de formas de vida artificial.

NEUROCIENCIA

32 Magia y cerebro

Susana Martinez-Conde y Stephen L. Macknik

Los magos han estado explotando y poniendo a prueba los límites de la cognición y la atención durante siglos. Los neurocientíficos están empezando a darles alcance.

INGENIERIA

46 Seguridad dinámica para automóviles

Steven Ashley

Las técnicas de seguridad en automoción podrían ofrecernos vehículos que redujesen mucho la posibilidad de sufrir un accidente e incluso que no necesitaran conductor.

FISICA

54 El efecto Casimir

Emilio Elizalde

El efecto Casimir es la manifestación más palpable que se conoce de las fluctuaciones de energía en el estado vacío de un sistema cuántico por la acción de condiciones externas.

EVOLUCION

64 Origen y evolución de los murciélagos

Nancy B. Simmons

El registro fósil y el análisis genético arrojan luz sobre la evolución de los murciélagos y zanjan un antiguo debate sobre los orígenes del vuelo y la ecolocación.



Encélado, satélite de Saturno, encierra grandes sorpresas.



El RATON-RMN consta de un imán de herradura y una bobina de radiofrecuencia.



Los murciélagos son los únicos mamíferos que vuelan.

GENETICA

73 ¿Qué es la ontología génica?

Michael Seringhaus y Mark Gerstein

Los estudios genómicos a gran escala cuestionan la definición tradicional de gen y demandan un enfoque nuevo para la clasificación molecular de la vida.

TECNICAS ANALITICAS

82 RMN portátil

Bernhard Blümich

Una versión portátil de las imponentes máquinas de resonancia magnética nuclear explora la química y la estructura de objetos muy dispares, de momias a neumáticos.

SECCIONES

3 CARTAS AL DIRECTOR

4 HACE...

5 PUESTA AL DIA

6 APUNTES

Salud... Etología... Energía... Paleontología... Psiquiatría.

8 CIENCIA Y SOCIEDAD

Síndrome de Zellweger... Plantas ruderales... Puertas nanoscópicas... Resistencia a la deforestación... Persiguiendo el arco iris.

40 DE CERCA

Pingüino de Magallanes, por *Jesús Noriega, Montse García y Josep-Maria Gili*

42 PERFILES

John Pawelek: Teoría de una fusión letal, por *Charles Q. Choi*

44 DESARROLLO SOSTENIBLE

Apagones y quiebras en cadena, por *Jeffrey D. Sachs*

45 CIENCIA Y GASTRONOMIA

El chocolate, por *Pere Castells*

88 CURIOSIDADES DE LA FISICA

Rebote o rotura, por *Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik*

90 JUEGOS MATEMATICOS

¿Cuán difícil es el problema lógico más difícil de la historia? por *Gabriel Uzquiano*

92 IDEAS APLICADAS

Hornos de microondas, por *Mark Fischetti*

94 LIBROS

Materia. Embriología ilustrada.



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser, Christine Soares y Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
MANAGING EDITOR, ONLINE Ivan Oransky
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Encélado*; Juan Manuel González Mañas: *Una nueva biomolécula*; Susana Martínez-Conde: *Magia y cerebro*; Joandomènec Ros: *Origen y evolución de los murciélagos*; Pilar García-Villalba: *¿Qué es la ontología génica?*; J. Vilardell: *RMN portátil*, *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Puesta al día* y *Apuntes*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*



Portada: Ron Miller

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo S.L. (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Vigilados por los vecinos

Me entra risa cada vez que leo acerca de "la pérdida de privacidad", y así me ha ocurrido con el artículo de Daniel J. Solove "¿El fin de la privacidad?", de noviembre 2008, y lo que dice sobre las redes sociales. La gente parece confundir muy a menudo la privacidad con el anonimato, que inventamos hace sólo unas pocas generaciones. Anteriormente, casi todo el mundo vivía en aldeas o pequeñas poblaciones, lo cual limitaba la privacidad e impedía el anonimato.

El desarrollo de grandes ciudades nos concedió el anonimato: esto permite que algunos hagamos cosas que quizá no hubiéramos hecho en los pueblos, donde no se cometían tantos delitos porque todo el mundo se conocía. Ese control social estaba ya esperando el relevo; nuestras aldeas ahora son electrónicas.

Sheri S. Tepper
Santa Fe, Nuevo México

RESPONDE SOLOVE: *Hay una diferencia esencial entre los pueblos de antaño, en los que todos se llamaban por el nombre, y la invasora "aldea global" de hoy. En las poblaciones pequeñas la gente se conocía bien y podían juzgarse unos a otros dentro de un contexto; hoy la vida es mucho más anónima, y a menudo nuestros juicios se basan en fragmentos de información inconexos. Esto empobrece bastante la comprensión y valoración de quienes nos rodean, pues la información de que disponemos es mucho más dudosa. Las modernas técnicas electrónicas no pueden recrear la idílica imagen de las aldeas. Además, un rápido vistazo a la literatura y la historia del siglo XIX nos asoma a un mundo lleno de normas opresivas, vecinos fisgones y comunidades prontas a condenar, a menudo injustamente. Aunque el control social pueda tener algo de bueno, lo tiene también de malo, y a veces es puramente injusto, asfixiante, descarriado y cruel.*

¿Molestan las etiquetas?

El artículo "Etiquetas personales de RFID" (noviembre de 2008), de Katherine Albrecht, prosigue el importante debate en torno a la privacidad y la identificación por radiofrecuencia (RFID), debate por el que EPCglobal se interesa desde hace tiempo. Pero es preciso recordar a los lectores que la mayoría de las etiquetas RFID no almacenan ni captan informaciones personales. Al igual que los archiconocidos códigos de barras, el código electrónico de producto (ECP) contenido en la etiqueta es una secuencia de números que identifica sólo una cosa —generalmente la propia etiqueta—, no una persona. Por lo tanto, no viene a cuento precaverse contra la lectura de las etiquetas por cualquier poseedor de un lector de RFID: esa lectura no proporcionaría información personal ni acceso a la misma.

Esta técnica emergente es un poderoso instrumento para mejorar la seguridad de personas y bienes, así como el acceso a alimentos, medicamentos y otros productos, con enormes beneficios sociales. Para saber más sobre RFID y EPC y nuestras directrices de privacidad, puede visitarse http://aboutepc.org

Elizabeth Board
Comité Directivo de Políticas Públicas de EPCglobal

Albrecht ofrece una vista general de las técnicas de RF y sus amenazas a la privacidad. Las etiquetas RFID basadas en el estándar EPC Gen 2 de EPCglobal difieren de los chips que cumplen los estándares internacionales ISO/IEC 7816 e ISO/IEC 14443 de tarjetas ID. Hace tiempo que la Alianza de Tarjetas Inteligentes viene diciendo que las etiquetas RFID EPC Gen 2 pueden plantear graves problemas de privacidad y no son apropiadas para documentos de identidad.

Las etiquetas de RFID EPC Gen 2 fueron diseñadas para *permitir* el seguimiento; su seguridad es mínima o nula y son legibles a distancias de hasta 10 metros. Las tarjetas inteligentes habilitadas para RF contienen un microprocesador con todas sus funciones y ofrecen servicios de seguridad, como la criptografía de clave pública, la autenticación mutua y el cifrado de comunicaciones. Operan en un margen de 10 centímetros para *impedir* el seguimiento o la escucha furtiva.

Randy Vanderhoof
Alianza de Tarjetas Inteligentes

¿Efecto invernadero o calentamiento global?

En "Plancton bacteriano de los océanos", de José M. González, Carlos Pedrós-Alió y Josep M. Gasol (Investigación y Ciencia, diciembre de 2008) hemos detectado una imprecisión. En el recuadro "Bacterias, azufre y clima" se afirma que el sulfuro de dimetilo (DMS) atenúa el efecto invernadero. Sería más oportuno decir que atenúa el calentamiento global, ya que en su ausencia la temperatura de la atmósfera sería de 3 a 4 grados mayor.

A partir del DMS se forman aerosoles de sulfato que condensan la humedad e incrementan la densidad de las nubes. Las nubes y el vapor de agua ejercen dos efectos simultáneos: el aumento del efecto invernadero de la atmósfera y el aumento del albedo terrestre (la relación entre la intensidad de la luz reflejada y la incidente); según el tipo de nubes, predomina uno u otro efecto. En el caso que han estudiado los autores, se supone que predomina el aumento del albedo terrestre y, por tanto, disminuye la temperatura de la atmósfera. En ningún caso se produce una disminución del efecto invernadero, sino todo lo contrario. La molécula responsable del mayor porcentaje de efecto invernadero en la atmósfera terrestre es la de agua. Ello se debe a su abundancia, no a su potencia (otros gases como el dióxido de carbono y el metano son mucho más potentes).

Basili Martínez Espinet
y **Francesc Martínez Espinet**, Manlleu

RESPONDE GONZALEZ: *En efecto, se trata de una imprecisión. Agradecemos la puntualización. Quisimos decir que el DMS atenúa el efecto del calentamiento global, como señalan los autores de la carta. El incremento del albedo tiene como resultado una reducción de la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre y, por tanto, una disminución de la temperatura.*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

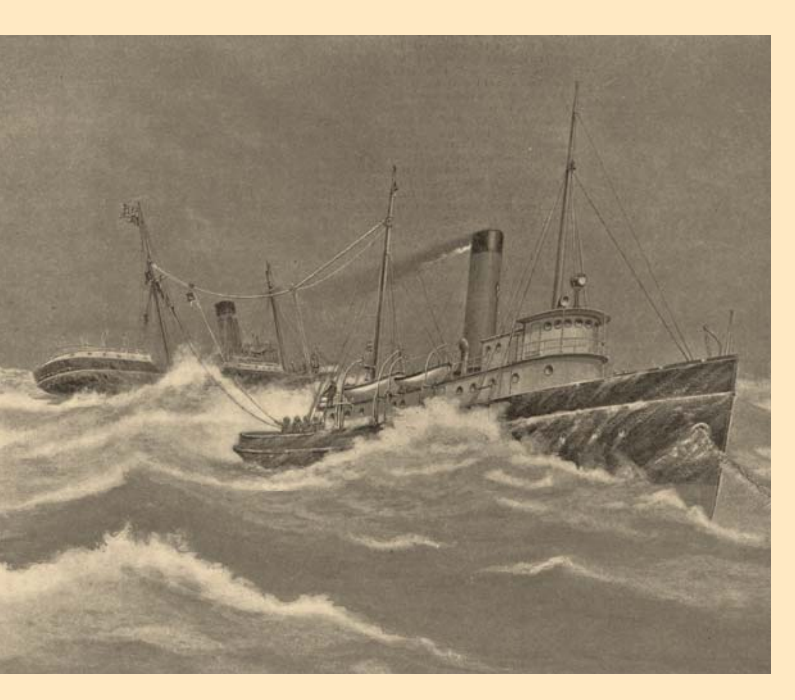
...cincuenta años

Cinturones de Van Allen. «Nuestro planeta está ceñido por una región —dos regiones, para ser exactos— de radiación de altas energías que se adentra en el espacio varios miles de kilómetros. Se trata de un hallazgo negativo para los astronautas, pues habrá que proteger de esta radiación al cuerpo humano, aunque éste la atraviese muy rápidamente. Pero las otras implicaciones del descubrimiento embelesan a geofísicos, astrofísicos, astrónomos solares y físicos de la radiación cósmica. La configuración de la región y la radiación que contiene delatan la existencia, en la vecindad de la Tierra, de un fenómeno físico de mayor importancia en el que participan rayos cósmicos y corpúsculos solares. Tan enorme depósito de partículas dotadas de carga eléctrica desempeña una función todavía no explicada de intermediario en la interacción entre la Tierra y el Sol, tal como reflejan las tormentas magnéticas, el resplandor celeste y los bellos despliegues de la aurora.

—James A. Van Allen»

Un dato que no tuvo Darwin. «Hace menos de un siglo, algunas especies de mariposa nocturna se caracterizaban por una coloración pálida que hacía juego con fondos tales como troncos de árbol claros y peñascos cubiertos de liquen; posado sobre los mismos, el insecto dejaba transcurrir inmóvil las horas diurnas. Pero hoy, en numerosas regiones, esa misma especie es predominantemente oscura. Desde que en la segunda mitad del siglo XVIII comenzó la Revolución Industrial, extensas zonas de la superficie terrestre se han visto contaminadas por una insidiosa precipitación de partículas de humo. Cuando el entorno de una mariposa como la *Biston betularia* cambia de tal modo que el insecto no puede ocultarse durante el día, éste es implacablemente eliminado por sus depredadores, salvo que mute para adaptarse mejor a las nuevas condiciones ambientales.

—H. B. D. Kettlewell»



Seguridad en el mar: el nuevo remolcador de salvamento en explotación por la Revenue Cutter Service, 1909.

...cien años

Remolcador de salvamento. «El descubrimiento de las riquezas minerales de Alaska desencadenó de inmediato un enorme desarrollo del comercio de cabotaje a lo largo del litoral noroccidental de EE.UU., sobre todo en Puget Sound. Tras la catástrofe del *Valencia*, el presidente Roosevelt nombró una comisión para que investigase las circunstancias del naufragio y recomendase algún procedimiento para salvar pasajeros en situaciones difíciles. El nuevo buque de salvamento, el 'Snohomish', tiene una eslora de 46 metros. Está equipado con una novedosa instalación que hace uso de un cable marino con una suerte de arnés para transbordar personas de una embarcación a otra y que se ilustra en funcionamiento.»

...ciento cincuenta años

Gorilas. «En Africa vive una tribu de monos enormes conocidos con el nombre de gorilas. Hace algunos años que el hombre blanco sabe de su existencia, pero hasta ahora no se ha capturado ninguno vivo. Habitan en remotos parajes de la selva; los machos son capaces de enfrentarse en pelea al león. El cráneo de uno de ellos se guarda en el Museo de Boston, enviado por el reverendo señor Wilson, misionero. El año pasado, desde Sierra Leona fue enviado al profesor Owen el cuerpo de un ejemplar, dentro de un barril de ron. El aspecto de los machos es terrible; su estatura supera el metro y medio y el tamaño de sus muñecas cuadruplica las de un hombre. Su fuerza es prodigiosa; uno de ellos puede arrancarle la cabeza a un hombre con la misma facilidad con que una persona descascarilla una espiga de maíz.»

Sociedad contra la mala suerte. «La única manera de demostrar la estupidez de la superstición es desafiarla abiertamente. Así lo están intentando un grupo de valerosos franceses. Se ha formado en Burdeos una sociedad con el fin de destruir la superstición de los malos augurios. Como todo el mundo sabe, trae 'mala suerte' acometer una tarea un viernes, sentarse trece a la mesa o derramar sal entre uno y un amigo. La nueva sociedad se propone celebrar una comida de trece comensales cada viernes y esparcir sal antes de empezar.»

[NOTA: Parece que aquella sociedad no ha perdurado.]

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. C, N.º 10; 6 DE MARZO DE 1909

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Extinción por enfermedad

Las teorías sobre las causas de la extinción del mamut lanudo y de otros especímenes de la megafauna norteamericana, hace unos 11.000 años, se han centrado durante largo tiempo en el cambio climático y en la presión de la caza por humanos. Pero en 1997 se propuso otro presunto culpable: una enfermedad hiperletal introducida en aquellos colosos, inmunitariamente ingenuos, por perros u otras plagas que acompañaron a los humanos en su llegada al Nuevo Mundo.

En fecha reciente, Alex D. Greenwood, de la Universidad Old Dominion, y sus colaboradores han ofrecido la primera prueba de extinción de mamíferos inducida por enfermedad. Los análisis genéticos indican que dos especies de ratas endémicas de la isla de Navidad, en el océano Indico, se extinguieron tras contraer un patógeno letal cuyo vector eran las ratas negras, llegadas en el *SS Hindustan* en 1889. Menos de un decenio después del desembarco de las ratas negras, habían desaparecido las ratas endémicas. Los hallazgos se publicaron en *PloS ONE* del pasado 5 de noviembre.

—*Kate Wong*



1. ESTRELLAS TEMBLONAS. Las perturbaciones internas que alcanzan la superficie de una estrella arrojan datos sobre el interior de la misma.

Temblores estelares

Con el telescopio espacial COROT, empresa internacional encabezada por Francia, se buscan planetas en otras estrellas y ondulaciones de las superficies estelares. COROT no está decepcionando a los astrónomos. El otoño de 2008 anunciaron que, gracias a él, se había descubierto un exoplaneta de masa 20 veces mayor que la de Júpiter, lo que plantea si tal objeto corresponde a un planeta o a una estrella frustrada. El telescopio permitió también la observación de vibraciones y granulaciones superficiales en tres estrellas, accidentes que se habían estudiado sólo en el Sol. De modo semejante a la sismología terrestre, estos "astromotos" proporcionan información sobre el interior de las estrellas. En el caso de estas tres estrellas, descrito en *Science* de 24 de octubre, las oscilaciones presentaban un 75 por ciento de la intensidad prevista por los modelos teóricos.

Clonación de ratones en hielo

Es una lástima que la isla de Navidad no se halle cercana al polo Norte. Las ratas extintas de esa isla podrían haber dejado restos congelados que permitieran resucitar la especie por clonación, una idea que se propuso para la conservación de especies. En un nuevo estudio, científicos japoneses han creado clones sanos de ratones conservados a –20 ºC sin crioprotección. Para ello tomaron núcleos celulares, sobre todo de neuronas descongeladas, y los introdujeron en células hospedadoras; obtuvieron así una línea de células pluripotentes embrionarias, a partir de las cuales criaron 13 ratones.

La congelación y el deshielo provocan la ruptura de las células y lesionan el ADN, pero el trabajo, expuesto en la Red en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, revela que sobrevive parte de la información genética. Este éxito alienta la esperanza de recuperar mamuts lanudos y otras criaturas extintas, que pudieron quedar congeladas.



2. ESTA BOLITA de pelaje oscuro es un clon de un ratón que permaneció 16 años congelado.



3. LOS VASOS SANGUINEOS se dilatan por efecto del sulfuro de hidrógeno, gas conocido por su hedor.

Relajación con sulfuro de hidrógeno

En los años ochenta del siglo pasado se descubrió que el óxido nítrico relajaba los vasos sanguíneos y desempeñaba un papel crucial en la salud cardiovascular. Existe otro gas sencillo, inorgánico, que también actúa como vasodilatador: el sulfuro de hidrógeno, responsable del hedor de los huevos podridos. Ratones modificados mediante ingeniería genética para que no generasen la enzima CSE (productora de sulfuro de hidrógeno) carecían de este gas, que suele hallarse en sus tejidos. Estos ratones desarrollaron hipertensión y no respondieron bien a compuestos que relajan los vasos sanguíneos. Es probable que también los vasos sanguíneos humanos produzcan sulfuro de hidrógeno, por lo que este estudio (en *Science*, 24 de octubre) abriría el camino hacia nuevos tratamientos de la hipertensión.

Erratum corrige

En la sección "Hace" del número de febrero de 2009, en la nota titulada "Restallidos" se afirma erróneamente que la punta del látigo era "un 25 por ciento más rápida que la luz". Debería leerse "un 25 por ciento más rápida que el sonido".

CORTESIA DEL OBSERVATORIO ANGLO-AUSTRALIANO (*estrellas*); CORTESIA DE S. FRANDSEN *Universidad de Aarhus (ondulación estelar)*; SUSUMU NISHINAGA *Photo Researchers, Inc. (vasos sanguíneos)*; CORTESIA DE TERUHIKO WAKAYAMA *Centro Riken de Biología del Desarrollo (ratón)*

SALUD

La docena mortal



La Asociación para la Conservación de la Vida Salvaje ha publicado un informe de 12 enfermedades que probablemente se propagarán y agravarán a medida que el planeta se caliente, la pauta de las precipitaciones cambie y los brotes menudeen. Las enfermedades son: la gripe aviar (cepa H5N1), la babesiosis (una enfermedad similar a la malaria), el cólera, el ébola, las infecciones de parásitos de animales (así, el gusano *Baylisascaris procyonis*), la enfermedad de Lyme, la peste, los envenenamientos por mareas rojas, la fiebre del valle del Rift, la enfermedad del sueño, la tuberculosis y la fiebre amarilla. Para evitar que estas enfermedades se conviertan en el equivalente de la próxima Peste Negra o gripe de 1918, la Asociación propone que se vigile la vida salvaje, a fin de detectar precozmente los signos de estos elementos patógenos y evitar el brote.

—David Biello

ETOLOGIA

Hormigas sacrificadas

La hormiga brasileña *Forelius pusillus* alcanza cada noche nuevas cuotas de abnegación. Al anochecer, las hormigas defienden su hogar bloqueando con arena todas las entradas. Hasta ocho obreras permanecen fuera para terminar el trabajo y allí mueren antes del amanecer. Se trata del primer ejemplo conocido de misión suicida que tiene una causa preventiva y no es una respuesta a un peligro de carácter inmediato.

El ecólogo experto en comportamiento animal Adam Tofilski y su equipo de la Universidad Agrónoma de Cracovia descubrieron que las hormigas no eran obreras rezagadas que se quedasen involuntariamente fuera. Colaboraban de modo deliberado para bloquear las entradas; empleaban hasta 50 minutos colocando arena en los accesos para que quedaran camuflados. El grupo polaco observó en sus experimentos que sólo seis de las 23 hormigas abandonadas en el exterior sobrevivieron hasta la mañana siguiente. Quedó demostrado que su acto era un verdadero sacrificio. La causa de la muerte de las hormigas no está clara. Se trata de una especie delicada, pero los investigadores sospechan que los insectos que se quedaban fuera podrían ser viejos o estar enfermos.

—Charles Q. Choi

ENERGIA

Combustible más autónomo

Los campos eléctricos pueden aumentar los kilómetros recorridos por un automóvil por litro de gasolina hasta en un 20 por ciento. La mejora se debe a que los campos eléctricos pueden reducir la viscosidad de los líquidos (*véase* "Fluidos electrorreológicos"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1993]. La reducción de la viscosidad del combustible implica que se puede disminuir el tamaño de las gotas inyectadas en el motor y lograr de este modo una combustión más eficiente. Un equipo de la Universidad de Temple redujo la viscosidad del combustible acoplando un tubo cargado con electricidad al tubo de combustible de un motor de gasoil, cerca del inyector. En las pruebas de carretera, el tubo añadido, que consumía menos de 0,1 watt, aumentó el rendimiento del combustible de 7,4 litros por 100 kilómetros a 6,2. Se espera que el dispositivo pueda usarse en todo tipo de motores de combustión interna.

—Charles Q. Choi

PALEONTOLOGIA

La supervivencia del más afortunado

Los dinosaurios quizá dominaron la Tierra gracias a la fortuna. Su posición preeminente a lo largo de 135 millones de años da a entender que tenían algo inherentemente superior a los demás animales. Para descubrir por qué los dinosaurios alcanzaron esa posición de dominio, un grupo de paleontólogos investigó su amanecer, en el Triásico tardío, hace entre 230 y 200 millones de años. Y hallaron que sus principales competidores en esa época, los crurotarsanos (los antepasados de los cocodrilos), se las arreglaban muy bien. Los fósiles muestran que los crurotarsanos tenían una diversidad dos veces mayor que los dinosaurios en sus configuraciones corporales, dieta y formas de vida, y abundaban más que ellos en muchos ecosistemas. Por lo tanto, concluyen estos científicos de la Universidad de Bristol y del Museo Norteamericano de Historia Natural de Nueva York, los dinosaurios no ganaron la batalla a los crurotarsanos: a éstos los barrió un drástico cambio climático de finales del Triásico. Por alguna razón, el cambio no afectó a los dinosaurios; de otro modo, los crurotarsanos hubieran sido los que heredasen la Tierra.

—Charles Q. Choi



PHOTO RESEARCHERS, INC. (*virus ébola*); © *iStockphoto*/SUSAN FLASHMAN (*cocodrilo*)

PSIQUIATRIA

Reivindicación freudiana

La utilidad real de la psicoterapia intensa se ha convertido, desde hace mucho, en objeto de polémica. Ahora, un grupo de investigadores ha anunciado que puede ser efectiva contra problemas mentales crónicos, como la ansiedad y la depresión. Examinaron 23 estudios que analizaban los resultados de aplicar terapia psicodinámica a 1053 pacientes (la terapia psicodinámica, afín al psicoanálisis, investiga las raíces subconscientes de los trastornos mentales y se centra en la relación entre el paciente y el terapeuta). La psicoterapia de más de un año de duración era significativamente más eficaz, y más económica, para los problemas mentales complejos.

—Charles Q. Choi



FISIOLOGIA

¿Por qué la voz me suena diferente en una grabación?

El sonido puede llegar hasta el oído interno por dos sendas independientes, que pueden, a su vez, afectar a lo que percibimos. Los sonidos que el aire transmite son conducidos a través del canal auditivo externo, el tímpano y el oído medio hasta la cóclea, una espiral llena de líquido que se encuentra en el oído interno. En cambio, el sonido transmitido por vía ósea alcanza la cóclea directamente, a través de los tejidos de la cabeza.

Al hablar, la energía sonora se difunde por el aire que nos rodea y llega hasta la cóclea a través del oído externo, por conducción aérea. Pero el sonido también viaja directamente desde las cuerdas vocales y otras estructuras hasta la cóclea, y las propiedades mecánicas de la cabeza refuerzan las vibraciones de baja frecuencia, de tonos más graves. La voz que nos oímos cuando hablamos es la combinación del sonido transmitido por ambas vías. Cuando escuchamos una grabación de nuestra propia voz, se elimina la senda de conducción ósea, que nosotros consideramos parte de nuestra voz "normal", y solamente oímos la componente transmitida por el aire, aisladamente, que no nos es familiar. Podemos experimentar el efecto inverso taponándonos los oídos, con lo que solamente oiremos las vibraciones conducidas por los huesos.

Algunas personas sufren anomalías del oído interno, que intensifican tanto la sensibilidad al componente de transmisión interna, que el sonido de su propia respiración les resulta agobiante, y pueden llegar incluso a oír el movimiento de sus ojos en las órbitas.

—Thimoty E. Hullar
Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, San Luis



© iStockphoto/DENNIS COX (dibujo); COLORBLIND (mujer hablando)

CALENTAMIENTO GLOBAL

Concienciación política y social en EE.UU.

A pesar de que el problema del calentamiento global es apremiante, el Congreso estadounidense se ha esforzado en debatir y aprobar proyectos de ley que en vez de corregir el problema, lo empeorarían. Así, hemos visto desfilar, una tras otra, propuestas de ley que pretendían derogar logros como la prohibición de prospecciones petrolíferas en zonas costeras. Por fortuna, se han renovado las esperanzas de cambio con la nueva administración del Presidente Barack H. Obama y su política respecto del calentamiento global, su compromiso de frenar la crisis climática ye su voluntad de invertir en energías limpias.

Amén de una nueva política ambiental, el freno de la crisis exige también la concienciación de los ciudadanos. Para asegurar que la comunidad hispanohablante estadounidense participa en este proyecto global, el Consejo de EE.UU. para la Defensa de Recursos Naturales ha creado el programa en línea "La onda verde" (www.laondaverde.org). Asimismo, el sector empresarial debería aprovechar el impulso de la industria verde emergente; las empresas podrían beneficiarse de los incentivos económicos y la exención de impuestos que se conceden al desarrollo de soluciones que nos lleven hacia un futuro económico y ecológico sostenible.

—Adrianna Quintero
La Onda Verde, Consejo para la Defensa de Recursos Naturales, EE.UU.

El síndrome de Zellweger

Los niños que sufren esta grave enfermedad suelen recibir un tratamiento inadecuado que acelera su muerte. Si, en cambio, se les administra cierto ácido graso y una dieta equilibrada, mejora su cuadro clínico

Vale la pena considerar el daño que la falta de información puede llegar a producir a los niños afectados por el síndrome de Zellweger. Tratados a tiempo, su vida mejoraría. Pero las ideas dominantes en torno a las medidas a tomar no sólo no suponen ningún alivio, sino que causan un empeoramiento, convirtiendo a unos niños ya gravemente enfermos en desnutridos profundos.

El síndrome cerebro-hepato-renal, o de Zellweger, es una enfermedad rara. Se trata de un trastorno metabólico congénito grave que conduce a la muerte durante los primeros meses de vida. Algunas variantes encierran menor gravedad, pero pueden resultar letales a corto plazo si no reciben tratamiento adecuado. El trastorno se caracteriza por la falta de peroxisomas.

Los peroxisomas son orgánulos intracelulares cargados de enzimas que catalizan reacciones de importancia para el metabolismo de los lípidos. La ausencia o disfunción de los peroxisomas provoca la acumulación de ciertos compuestos que no se degradan (ácidos grasos de cadena muy larga, ácido pristánico, ácido fitánico) y el déficit de otros que no se sintetizan (plasmalógenos y ácidos biliares). La formación defectuosa de peroxisomas se considera la causa principal de las anomalías señaladas. De ahí la denominación de enfermedades de la biogénesis peroxisomal o enfermedades peroxisomales generalizadas.

La diversidad en que se manifiestan esas patologías dificulta sobremanera el diagnóstico y el pronóstico de cada variante. Tampoco los estudios genéticos han puesto orden en los fenotipos, ni en el pronóstico del mal. Incluso dentro de una misma familia, dos hermanos de idéntico genotipo pueden mostrar diferencias notables en el fenotipo y, por ende, en el pronóstico.

Síntomas

Suelen aceptarse tres fenotipos: síndrome de Zellweger, adrenoleucodistrofia neonatal (NALD, de "neonatal adrenoleukodystrophy") y enfermedad de Refsum infantil (IRD, de "Infatile Refsum's disease"). Con una experiencia de más de sesenta pacientes, nos atrevemos a afirmar que tal distinción peca de artificiosidad. A falta de una clasificación genética más específica, habrá que tomar estos tres fenotipos como un todo heterogéneo bajo la denominación común de síndrome de Zellweger. Por su extrema gravedad y particularidades bioquímicas, la única variante que se distingue de las demás es el síndrome de Zellweger "clásico".

Todas las variantes comparten ciertos signos y síntomas. De entrada, un desarrollo cerebral alterado. En los casos de mayor gravedad suelen aparecer convulsiones desde el nacimiento. La hipotonía y el retraso psicomotor son constantes. Muy tempranamente se manifiestan trastornos neurosensoriales, con ceguera y sordera progresivas. Se produce hepatomegalia, acompañada en ocasiones de esplenomegalia. La función hepática se halla alterada.

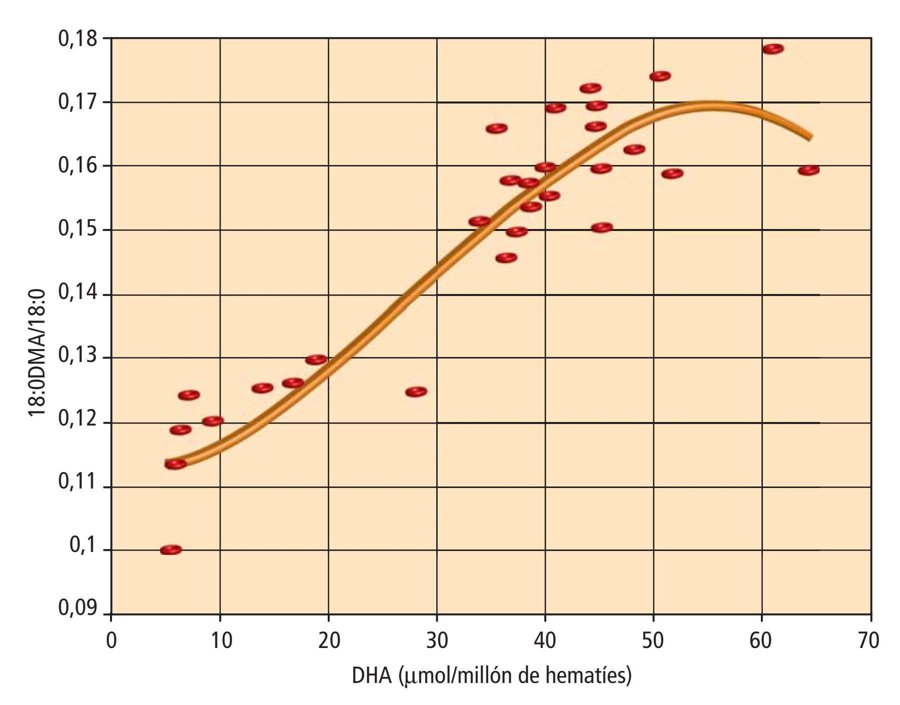
Sobre todo en los primeros estadios de la vida, la alimentación de los niños afectados entraña notables dificultades, por culpa de unos reflejos de succión y deglución muy débiles. Se retarda el aumento de peso y talla. Se resiente la digestión de las grasas; con frecuencia aparece esteatorrea. La osificación es defectuosa, con cierre muy tardío de la fontanela anterior. La dentición se retrasa. Se produce osteopenia generalizada, que suele originar fracturas en pacientes encamados.

En el síndrome de Zellweger "clásico" se detecta radiológicamente un punteado óseo característico, visible en rótulas y acetábulos (condrodisplasia punctata). Suelen observarse quistes renales. De ahí la denominación de síndrome cerebro-hepato-renal. No es infrecuente la manifestación, en una etapa avanzada, de insuficiencia suprarrenal que requiere tratamiento.

El encéfalo sufre alteraciones profundas, desde el punto de vista neuronal y de la mielina. En los casos más graves, algunas neuronas no migran a la corteza cerebral; forman grupos aislados subcorticales (heterotopias). Las circunvoluciones cerebrales se resienten en su número, tamaño y grosor (polimicrogiria y paquigiria). Al no poder formarse con normalidad, la mielina es escasa y deficiente (dismielinización). Otras veces, el encéfalo adquiere una cantidad normal de mielina que se pierde en una etapa posterior (desmielinización). En la reti-



1. Dos hermanos con síndrome de Zellweger. El mayor (*derecha*, a los 8 meses) no fue diagnosticado hasta los 3 años de edad, tras el nacimiento de su hermana (*izquierda*). A causa de ello, el niño recibió una alimentación basada en lactancia materna y una dieta normal. A pesar de sus deficiencias, presentaba un buen estado nutricional, conservaba la visión y se mostraba alegre y sociable. Su hermana, en cambio, fue diagnosticada al poco de nacer. Desde entonces, se alimentó exclusivamente mediante una fórmula comercial pobre en grasas. Aquí la vemos a los 13 meses de edad, en fase terminal de su enfermedad y en un estado de desnutrición profunda.



2. La administración de etil éster de DHA resulta en un aumento de la concentración de plasmalógenos. Así lo muestra esta gráfica del índice de plasmalógenos en hematíes respecto del nivel de ácido docosahexaenoico (DHA). Corresponde a una paciente con síndrome de Zellweger tratada con etil éster de DHA. (18:0DMA/18:0 se refiere al cociente entre el 18:0 dimetil acetal, plasmalógeno de 18 átomos de carbono, y el ácido graso 18:0, también de 18 átomos de carbono.) La concentración de plasmalógenos se normalizó a partir de los 35 μmoles/millón de hematíes de DHA y alcanzó valores óptimos alrededor de los 50 μmoles/millón de hematíes de DHA.

na, es común hallar cúmulos ecuatoriales de pigmento (retinopatía pigmentaria) y, en ocasiones, atrofia óptica.

Causas

A pesar de la abundancia de estudios realizados sobre el síndrome de Zellweger, su patogenia permanece todavía en la oscuridad. El daño cerebral suele atribuirse a la acumulación de ácidos grasos 26:0 y 26:1 (la cifra de la izquierda designa el número de átomos de carbono y la de la derecha el número de dobles enlaces), que no se degradan debido a la falta de peroxisomas. Otra causa posible de la alteración cerebral estriba en la disminución de los niveles de plasmalógenos, fosfolípidos característicos de la mielina cerebral, en donde se hallan en gran proporción.

En nuestro laboratorio detectamos otra deficiencia que explicaría muchas de las anomalías de la enfermedad: nos referimos a la falta de ácido docosahexaenoico (DHA), ácido graso poliinsaturado de 22 átomos de carbono y 6 dobles enlaces (22:6ω3). Puesto que el DHA resulta esencial para el desarrollo del cerebro y la retina, cabía esperar que la causa de una enfermedad caracterizada por alteraciones neurológicas y visuales graves guardara relación con un déficit de DHA. Y así, en 1987, descubrimos la relación entre la enfermedad y esa carencia.

El primer paciente estudiado presentaba síndrome de Zellweger clásico; sus niveles de DHA en sangre, cerebro, hígado y riñones eran sumamente bajos. Comprobamos luego que la carencia de DHA constituía un signo constante en las enfermedades peroxisomales generalizadas.

Apoyado en tales resultados, el grupo de Howard Sprecher, de la Universidad estatal de Ohio, elaboró una hipótesis que vincula la síntesis defectuosa del DHA a la falta de peroxisomas: el DHA se produciría mediante la β-oxidación peroxisomal de un compuesto dos carbonos más largo, el 24:6ω3; en ausencia de peroxisomas, pues, la síntesis de DHA se vería alterada. Esa teoría revolucionó en su momento las ideas que existían respecto a la síntesis del DHA. En la actualidad, es la más aceptada.

Tratamiento

Nos preguntamos entonces si la carencia de DHA de los enfermos con síndrome de Zellweger podría corregirse mediante el aporte externo de este compuesto y si ello mejoraría su cuadro clínico. En 1991 iniciamos en nuestro laboratorio el ensayo de un tratamiento basado en la administración de etil éster de DHA (DHA-EE). Los resultados han sido muy positivos, en algunos casos incluso espectaculares. Hemos observado un aumento del nivel de plasmalógenos en hematíes y un claro descenso de los ácidos grasos de cadena muy larga (VLCFA, de “very long chain fatty acids”) en plasma. La función hepática ha mejorado en todos los casos, traduciéndose en un descenso notorio de las enzimas hepáticas. Los resultados más notables corresponden a la mejora de la visión y al progreso en el desarrollo neuronal, tono muscular y actividad del niño, a menudo acompañado de una mejoría de la mielina cerebral.

La carencia de DHA constituye, por tanto, un signo clave de la enfermedad. El DHA se considera crucial para el correcto desarrollo del cerebro y la retina, por lo que se añade a las fórmulas lácteas de inicio. Sin embargo, ello no se tiene en cuenta a la hora de tratar a niños con síndrome de Zellweger, niños que, por su profunda carencia de DHA, lo necesitan más que ninguno. Al contrario, a esos pacientes se les recetan dietas pobres, sumamente restrictivas en grasas, con el fin de disminuir sus niveles de VLCFA y ácido fitánico. Ello provoca una mayor carencia de DHA y el consiguiente empeoramiento del cuadro clínico. La desnutrición conduce al niño a la muerte mucho antes de lo que sucedería si no recibiera tratamiento alguno.

Esos niños deberían tratarse con DHA-EE lo antes posible, pues es durante las primeras etapas del desarrollo cuando se produce la acumulación de DHA en el cerebro. La alimentación debe ser equilibrada y nutritiva, propia de un niño que está creciendo. Sólo así conseguiremos mejorías notables, neurológicas y del estado general. Las largas supervivencias conseguidas con DHA-EE abren nuevas esperanzas para el tratamiento de esta cruel enfermedad, a la vez que marcan una nueva línea de investigación sobre su patogenia.

Manuela Martínez Regúlez
Fundación Manuela Martínez para los Niños con Enfermedades Metabólicas
Laboratorio de Investigación, Barcelona

Plantas ruderales

Una relación milenaria de amor y odio que genera conocimiento, problemas y desafíos

El calificativo ruderal (del latín *ruderis*, escombro) se predica de terrenos incultos o donde se vierten desperdicios o escombros. Las plantas ruderales son las que aparecen en hábitats muy alterados por la acción humana, como bordes de caminos, campos de cultivos o zonas urbanas. Una buena parte de este conjunto de plantas coincide con la flora arvense, es decir, plantas que aparecen de forma espontánea en los campos de cultivo.

Esta sencilla descripción pone de manifiesto la íntima relación existente entre la flora ruderal y la actividad humana. Alteraciones del medio como la construcción de infraestructuras o la roturación de los campos abren constantes oportunidades para la colonización por estas plantas, omnipresentes en el banco de semillas de los suelos antropizados. La especie humana las transporta e introduce accidental o intencionadamente allá donde pise.

La mayoría de las plantas ruderales son hierbas anuales o bianuales de ciclo de vida corto, generalmente de amplia distribución geográfica, con tasas de crecimiento rápidas y con una alta producción de semillas. Aunque la flora ruderal de un lugar está influida por numerosas características ambientales, los catálogos de flora ruderal ibérica muestran el predominio de las compuestas (entre ellas, las margaritas), leguminosas (entre ellas, los tréboles) y gramíneas (como la avena loca). Este predominio de unas pocas familias de plantas en la flora ruderal se repite por todo el mundo y, con la creciente globalización, los bordes de los caminos más dispares cuentan cada vez más con el mismo elenco de plantas.

Por su carácter colonizador, las plantas ruderales se establecen con rapidez y tienden a desaparecer también deprisa de la zona colonizada. Sin embargo, algunas de estas plantas permanecen indefinidamente, colonizando una y otra vez zonas alteradas, los campos de cultivo por ejemplo, donde ocasionan grandes perjuicios. De ahí su apelativo de *malas hierbas.* Sus breves ciclos biológicos aceleran la selección natural de genotipos adaptados a nuevas condiciones ambientales; llegan a adquirir resistencia incluso a los herbicidas. Esto, unido a su alta capacidad de reproducción y dispersión, hace que su control y eliminación resulten complejos y con frecuencia costosos.

En la península Ibérica existen unas 300 especies de plantas ruderales. Entre ellas, cabe citar las del género *Bromus* (bromos), como *B. madritensis*, *B. tectorum* o *B. diandrus*, que afectan tanto a cultivos de regadío como de secano y que causan pérdidas millonarias debido a su resistencia a los herbicidas. En muchos casos, cuesta controlarla debido a su alta producción de semillas, a la persistencia de éstas en el banco de semillas del suelo y a su amplio período de germinación. Existen otros ejemplos de plantas ruderales perjudiciales para el ganado, como *Senecio jacobaea*, que causa la muerte a caballos y ovejas tras su ingesta, y cuyo polen es, además, un fuerte alérgeno para los humanos.

Sin embargo, no todo lo relativo a las plantas ruderales es negativo. Facilitan la restauración de ecosistemas y se emplean en alimentación, biorremediación, ornamentación y medicina (incluso como afrodisíacos). El uso de plantas ruderales en los proyectos de restauración de zonas degradadas ha dado resultados positivos en muchos casos, ya que su rápido establecimiento y crecimiento asegura un pronto desarrollo de la cubierta vegetal, capaz de frenar la erosión del suelo. Asimismo, la presencia de especies leguminosas mejora la fertilidad del suelo gracias a los procesos de fijación de nitrógeno, que crean condiciones pro-



La vegetación ruderal se funde con las plantas arvenses en los bordes de caminos y sembrados. En primavera, las amapolas (*Papaver rhoeas*) se dan cita con manzanillas silvestres del género *Anacyclus* dando color a los lindes de encinares y sabinares del Parque Natural del Alto Tajo.

picias para el establecimiento posterior de otras especies. Algunas especies ruderales resultan valiosas en la restauración de suelos contaminados por residuos industriales o de minería. Por ejemplo, *Hirschfeldia incana* puede acumular en sus tejidos grandes cantidades de metales pesados (zinc, cobre, plomo).

Existen numerosas plantas ruderales útiles para la alimentación humana. Buenos ejemplos son *Daucus carota* (zanahoria silvestre), de raíz comestible, *Sonchus oleraceus* (cerraja), cuya raíz está muy valorada en la alta cocina, *Chicorium intybus* (achicoria), de la que se obtiene un nutritivo sucedáneo del café, o *Brassica nigra* (mostaza negra), cuyas semillas se usan como condimento. Muchas plantas ruderales tienen alto valor forrajero, como ciertas especies de los géneros *Vicia* o *Medicago*. Además, el uso de muchas de estas plantas con fines medicinales tiene una larga tradición. *Datura stramonium* (estramonio) se ha usado ampliamente como sedante, relajante o antiasmático, y se le han atribuido propiedades alucinógenas y afrodisíacas; *Papaver somniferum* (adormidera) se ha venido empleando desde tiempos inmemoriales para obtener opiáceos como la morfina.

Las plantas ruderales son, además, una fuente inagotable de recursos para la ingeniería molecular, ya que sus secuencias genéticas pueden aplicarse a la mejora de los cultivos. Se están aislando los genes relacionados con la tolerancia a las condiciones estresantes o a la resistencia a ciertas plagas y enfermedades, y se los está introduciendo en plantas de interés agrícola. El rápido ritmo de evolución de las plantas ruderales las convierte en un sistema ideal para el estudio de la evolución y la adaptación a condiciones locales.

Las plantas ruderales, por tanto, mantienen con la especie humana una milenaria relación de amor y odio. Es lógico pensar que su estudio seguirá deparando sorpresas y nuevas aplicaciones durante mucho tiempo.

Silvia Matesanz y **Fernando Valladares**
Instituto de Recursos Naturales,
Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC

Puertas nanoscópicas supramoleculares

Cuando se les aplican estímulos, liberan sustancias encerradas en sólidos con poros de escala nanométrica

La química supramolecular es la química de los enlaces no covalentes. Lejos de ocuparse de la intensa unión de átomos que comparten electrones entre sí para formar moléculas bien definidas, estudia otros vínculos más débiles y flexibles entre moléculas.

Se ha demostrado que la química supramolecular puede convertirse en uno de los pilares fundamentales de la nanotecnia. Mediante la aplicación de conceptos supramoleculares se ha logrado construir entramados de tamaño nanoscópico flexibles y versátiles. La química supramolecular facilita la generación de movimientos moleculares controlados y su aplicación al diseño de sistemas funcionales complejos que respondan a estímulos externos.

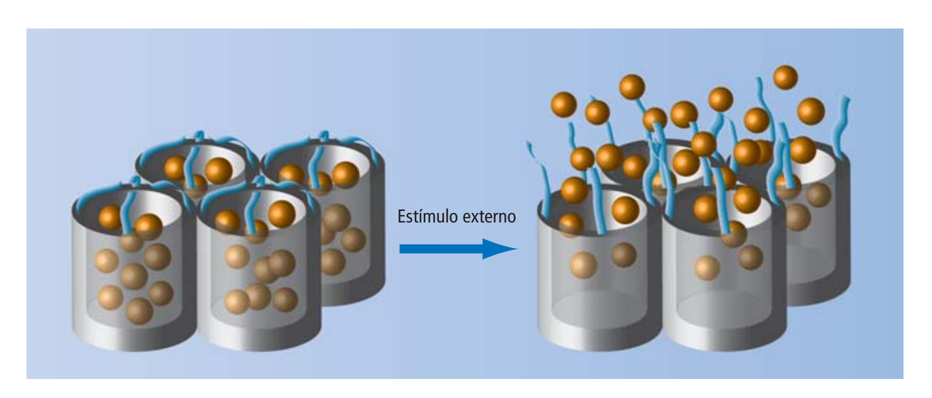
En general, hay dos maneras de construir una arquitectura supramolecular: mediante una síntesis paso a paso, que forma enlaces no covalentes, o por generación espontánea de estructuras moleculares complejas, gracias al autoensamblaje de unidades simples.

En un caso o en otro, la química supramolecular se ha venido aplicando de ordinario a disoluciones. Un procedimiento alternativo, que da lugar a sistemas más complejos funcionalmente, consiste en enlazar moléculas funcionales a estructuras sólidas preorganizadas. A esta química la podríamos denominar heterosupramolecular.

Pese a su interés, muchos de estos sistemas heterosupramoleculares se han desarrollado sólo sobre superficies lisas. Un paso adelante, con un grado de complejidad adicional, consiste en anclar las moléculas sobre sólidos porosos, de “superficie tridimensional”. Con esta expresión se quiere decir que su superficie, con poros y huecos, tiene una organización compleja en el espacio. Del trabajo con estos sistemas porosos nace la idea de las puertas nanoscópicas supramoleculares.

De una puerta supramolecular se puede dar la siguiente definición: es un sistema nanoscópico que contiene algún sistema molecular (la puerta propiamente dicha) que, mediante estímulos externos, conmuta entre una configuración a otra; esa conmutación puede controlarse a voluntad para regular un transporte de masa; por ejemplo, la salida de una determinada molécula confinada en el interior de los poros del sistema nanoscópico.

La ilustración muestra el esquema de una “puerta supramolecular”. Consta de un soporte sólido cuyos nanoporos sirven de contenedores de una sustancia y de ciertas moléculas o grupos moleculares acopladas a la superficie exterior del sólido. Esas moléculas son los elementos sobre los que actúan los estímulos externos para dejar que la sustancia encerrada en los poros quede liberada, o para que acceda al interior de los poros alguna otra especie molecular.



Representación esquemática de una puerta nanoscópica supramolecular.

De entre los diversos sólidos que pueden utilizarse en estos sistemas, los sólidos silíceos tipo MCM-41 tienen características muy adecuadas: son mesoporosos —presentan poros de entre 2 y 50 nanómetros; en el caso de los sistemas de puertas nanoscópicas, de 2 o 3 nanómetros, con una distribución muy homogénea de tamaño de poro— y la química de los procesos de anclaje en su superficie es bien conocida.

El estímulo que induce la liberación controlada de determinadas especies químicas en estos sistemas puede ser muy simple. Se han creado puertas supramoleculares que se activan con luz, con estímulos electroquímicos, mediante cambios del *p*H o con la presencia de determinadas moléculas.

Entre las distintas aplicaciones que se han sugerido para estos sistemas hay algunas muy atractivas. Van desde la liberación controlada de fármacos y la liberación controlada de determinadas substancias en el interior de las células hasta el desarrollo de nuevos "sensores" moleculares y la protección de la carga en determinadas circunstancias, seguida de una posterior liberación (por ejemplo, la protección de ciertas especies activas en las condiciones ácidas del estómago para su subsiguiente liberación en el intestino).

Con todo, el desarrollo de puertas nanométricas supramoleculares y sus potenciales aplicaciones está aún en sus inicios. En su favor, digamos que se ha demostrado que la construcción de ciertas funciones programadas en soportes inorgánicos adecuados es una forma interesante de acercar las ideas moleculares y supramoleculares a las fronteras de la nanociencia.

Ramón Martínez Máñez
María D. Marcos
Juan Soto y **Félix Sancenón**
Instituto de Química Molecular Aplicada,
Departamento de Química,
Universidad Politécnica de Valencia

Resistencia a la deforestación

Los beneficios de la dispersión de semillas por animales

La destrucción de hábitat natural constituye la primera causa de la pérdida global de biodiversidad. Resulta de cambios inducidos por el hombre, pero repercute directamente sobre el resto de las especies: altera la forma en que éstas interaccionan entre sí y con el entorno, y reduce la cantidad de recursos disponibles para la supervivencia. La respuesta de las especies a los cambios puede desembocar en colapsos biológicos y cascadas de extinción masiva. Ante ese problema, los ecólogos se preguntan cuál es la cantidad de hábitat necesaria para la persistencia de las especies.

La teoría de metapoblaciones predice que, en lugares donde se ha perdido una parte del hábitat natural, las especies tienen menor probabilidad de sobrevivir en los fragmentos de hábitat todavía intactos. Estudios recientes muestran que la respuesta a la pérdida de hábitat varía de una especie a otra (unas especies son más sensibles que otras). Se ha sugerido que tal variación en la respuesta interespecífica podría venir determinada por características demográficas de las especies, de manera que éstas se aglutinarían en grupos funcionales de sensibilidad. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han desarrollado a escalas espaciales o temporales restringidas, empleando un número limitado de especies (sobre todo aves y lepidópteros), con lo que los resultados apenas si pueden generalizarse.

En un trabajo publicado en 2008 en *Science*, analizamos, mediante una extensa base de datos, la relación entre la cobertura forestal local y la probabilidad de ocurrencia de 34 especies comunes de árboles, distribuidas en 90.000 puntos de muestreo a lo largo de la península Ibérica. Se trata de especies cuya respuesta a la deforestación presenta intensidades muy variables. Con todo, la mayoría de ellas (más de un 70 por ciento) responden negativamente a la deforestación: su probabilidad de ocurrencia disminuye en áreas con escasa cobertura forestal. Pocos árboles (17 por ciento) se benefician de la deforestación; ello se debe, probablemente, a la desaparición, en etapas de deforestación más tempranas, de especies más competitivas. La pérdida de hábitat ejerce, pues, sobre los árboles un efecto global negativo y reduce la biodiversidad del bosque.



El arrendajo (*Garrulus glandarius*) corresponde a una especie dispersora de semillas típica de bosques mediterráneos. El individuo de la fotografía transporta en el pico una bellota.

¿Dispersión zoócora o anemócora?

La forma en que un árbol dispersa sus semillas constituye un factor clave para entender la vulnerabilidad del mismo ante la deforestación. Las especies cuyas semillas son dispersadas por animales, aves y mamíferos, sobre todo (dispersión zoócora), suelen ser más resistentes a la deforestación que las especies cuyas semillas son dispersadas por el viento (dispersión anemócora). Esas diferencias marcadas por el tipo de dispersión son independientes de factores como la filogenia y el clima.

Dentro de cada grupo funcional existen diferencias entre especies. No todas

las especies dispersadas por animales son más resistentes a la pérdida de bosque que todas las especies dispersadas por el viento. Esas diferencias se deben a la intervención de otros factores no analizados que influyen en la respuesta a la deforestación: tamaño corporal y comportamiento trófico del animal dispersor, así como eventos poco comunes de dispersión a largas distancias. Sin embargo, los resultados demuestran que el tipo de dispersión constituye un factor crítico para comprender la respuesta a la pérdida de hábitat.

¿Por qué las especies dispersadas por animales son menos sensibles a la deforestación que las especies dispersadas por el viento? Dos características fundamentales distinguen la dispersión zoócora de la anemócora. En primer lugar, los animales llevan a cabo una dispersión "dirigida": transportan las semillas de los árboles a lugares adecuados para su germinación; el viento, en cambio, produce una dispersión aleatoria. En segundo lugar, la dispersión zoócora cubre mayores distancias que la dispersión anemócora. Ambos factores contribuyen al establecimiento de una conexión demográfica entre fragmentos de bosque físicamente aislados; la probabilidad de supervivencia de una semilla dispersada por un animal suele ser, por tanto, mayor.

El hecho de que ciertas especies de árboles muestren mayor sensibilidad que otras a la deforestación puede guiar los esfuerzos de conservación hacia dichas especies. A igualdad de condiciones, una especie dispersada por viento se verá más amenazada por la pérdida de hábitat que una especie dispersada por animales. No obstante, esta conclusión es cierta si, y sólo si, los animales que dispersan semillas no han desaparecido del bosque. Si éstos se extinguen, las especies de árboles correspondientes quedarán más expuestas, ya que no podrán dispersarse y sobrevivir más generaciones; ello acrecentará su vulnerabilidad a cualquier alteración del entorno que reduzca el hábitat (deforestación, por ejemplo).

Que la dispersión animal confiera mayor resistencia a las especies pone de manifiesto que las interacciones entre plantas (dispersadas) y animales (dispersores de semillas) resultan claves no sólo para la creación y mantenimiento de la biodiversidad, sino también para aumentar la resistencia de las especies a perturbaciones de origen natural o humano. La protección de estas interacciones debería guiar los esfuerzos de conservación, ya que el mantenimiento de las interacciones biológicas ayudará a reducir los ritmos de extinción actuales.

Daniel Montoya Terán
Departamento de ecología
Universidad de Alcalá

Persiguiendo el arco iris

Un nuevo material fotovoltaico utiliza el espectro solar entero



Los días nublados son los enemigos de la energía solar. La mayoría de las células fotovoltaicas sólo responden a una parte bastante pequeña del espectro solar, precisamente la parte que las nubes tienden a bloquear. Los fabricantes se enfrentan a este problema disponiendo capas de distintos materiales en las células, pero entonces salen más caras.

Un equipo dirigido por Malcolm Chisholm, ha tomado un camino diferente. Doparon un polímero que se usa a menudo como semiconductor, el oligotiofeno, con moléculas de los metales molibdeno y tungsteno. El resultado fue una sustancia que genera electricidad en respuesta a luz de longitudes de onda entre 300 (ultravioleta) y 1000 nanómetros (infrarrojo cercano). En cambio, las células tradicionales, basadas en silicio, tienen su mejor funcionamiento sólo entre los 600 (naranja) y los 900 nanómetros (rojo oscuro). El polímero puede funcionar con una gama tan amplia de frecuencias porque desarrolla un comportamiento lo mismo fluorescente que fosforescente.

La mayoría de los materiales de fabricación de células solares sólo exhibe fluorescencia: cuando reciben la luz solar, algunos de sus electrones se excitan hasta un estado de energía más alto y, al volver a su nivel original, emiten luz (si bien la fluorescencia no suele ser perceptible, ya que la longitud de onda de la luz emitida corresponde al infrarrojo, o es demasiado débil para verla de día; algunas células solares reutilizan esta luz para aumentar la eficiencia). Algunos de esos electrones alcanzan un grado tan alto de excitación, que llegan a liberarse de los átomos. Dan lugar así a una corriente eléctrica.

Sin embargo, los electrones no permanecen libres mucho tiempo; sólo billonésimas de segundo. Algunas veces vuelven a su estado original sin haber obtenido ningún resultado útil. Es una de las razones por las que el rendimiento de las células solares no es del cien por cien.

El polímero desarrollado por Chisholm y su equipo exhibe, además, fosforescencia. Los electrones mantienen más tiempo su energía en la fosforescencia que en la fluorescencia; permanecen libres durante más tiempo, microsegundos. Aunque, según sus cálculos, el equipo esperaba que el material tuviera un comportamiento fluorescente, al someterlo a ensayos se encontraron con que también era fosforescente.

Es el dopado lo que marca la diferencia. Tungsteno y molibdeno son átomos de metal que tienen más electrones disponibles para la conducción eléctrica que los del polímero. Además, la configuración electrónica de los metales permite que los electrones libres alcancen una vida más larga.

El equipo prepara el polímero como una fina película, similar a la utilizada en una célula solar. Sin embargo, deben transcurrir bastantes años hasta que se pueda construir un dispositivo práctico. Chisholm espera que, incluso aunque estas células solares de polímero resultasen menos eficientes que las de silicio, a la larga fueran más baratas de producir.

Jesse Emspak

ENCEL



Los paisajes rugosos y los surtidores de la sexta mayor luna de Saturno indican la posible presencia de aguas subterráneas

Carolyn Porco

CONCEPTOS BASICOS

- Encélado, satélite de Saturno, dispara chorros de partículas de hielo y vapor de agua cargados de compuestos orgánicos desde sus "rayas de tigre", profundas y calientes hendiduras de su superficie. ¿Cómo es posible que un cuerpo de apenas 500 kilómetros de diámetro desarrolle semejante actividad?
- La respuesta podría hallarse en la presencia de fluidos subterráneos, quizás un océano, que incrementan la eficiencia del calentamiento por fuerzas de marea. Los recientes acercamientos de la nave *Cassini* a Encélado apoyan la hipótesis.
- Si Encélado tiene agua líquida, se convertiría, junto a Marte y Europa, luna de Júpiter, en uno de los primeros lugares del sistema solar donde se podría buscar vida extraterrestre.

Cuando la nave espacial *Voyager 2* atravesó el sistema de Saturno hace más de un cuarto de siglo, se acercó a menos de 90.000 kilómetros de la luna Encélado. En el transcurso de unas pocas horas, las cámaras enviaron una secuencia de imágenes que han tenido confusos a los científicos planetarios durante años. Hasta comparada con los poliformes satélites de Júpiter parecía singular. Su superficie helada era blanca y brillante, como la nieve fresca. En algunas regiones, el terreno, liso y desprovisto de cráteres, difería del paisaje acribillado de cráteres de las otras lunas sin atmósfera: era un indicio claro de actividad geológica generada en el pasado desde el interior de Encélado, que con apenas un diámetro de 500 kilómetros no parece que sea capaz de producir calor por sí mismo. Aun así, algo inesperado debió de sucederle para que no quedase rastro de cráteres en esas zonas.

El breve encuentro del *Voyager* con Encélado permitió sólo un vistazo rápido. Ahora sabemos que hubo muy poca suerte con las regiones de Encélado que fotografió: tomó sólo unas cuantas imágenes de resolución media del hemisferio norte, algunas de baja resolución en el sur y ninguna del polo sur. No teníamos ni idea de lo que nos habíamos perdido.

El interés suscitado por la visita del *Voyager* hizo que el examen exhaustivo de Encélado se convirtiera en un objetivo fundamental de la misión *Cassini* a Saturno. Tras su lanzamiento en 1997, *Cassini* viajó durante siete largos años por el espacio interplanetario llevando consigo el surtido más complejo de instrumentos que jamás se hubiese enviado al sistema solar exterior. Llegó a puerto en el verano de 2004 [*véase* "Cassini-Huygens en Saturno", por Jonathan I. Lunine; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2004]. En diciembre de ese mismo año, *Cassini* lanzó una sonda hacia Titán, la mayor luna de Saturno. Inició luego su andadura por el resto del sistema de Saturno, sin olvidar a Encélado, al que ha examinado muy de cerca.

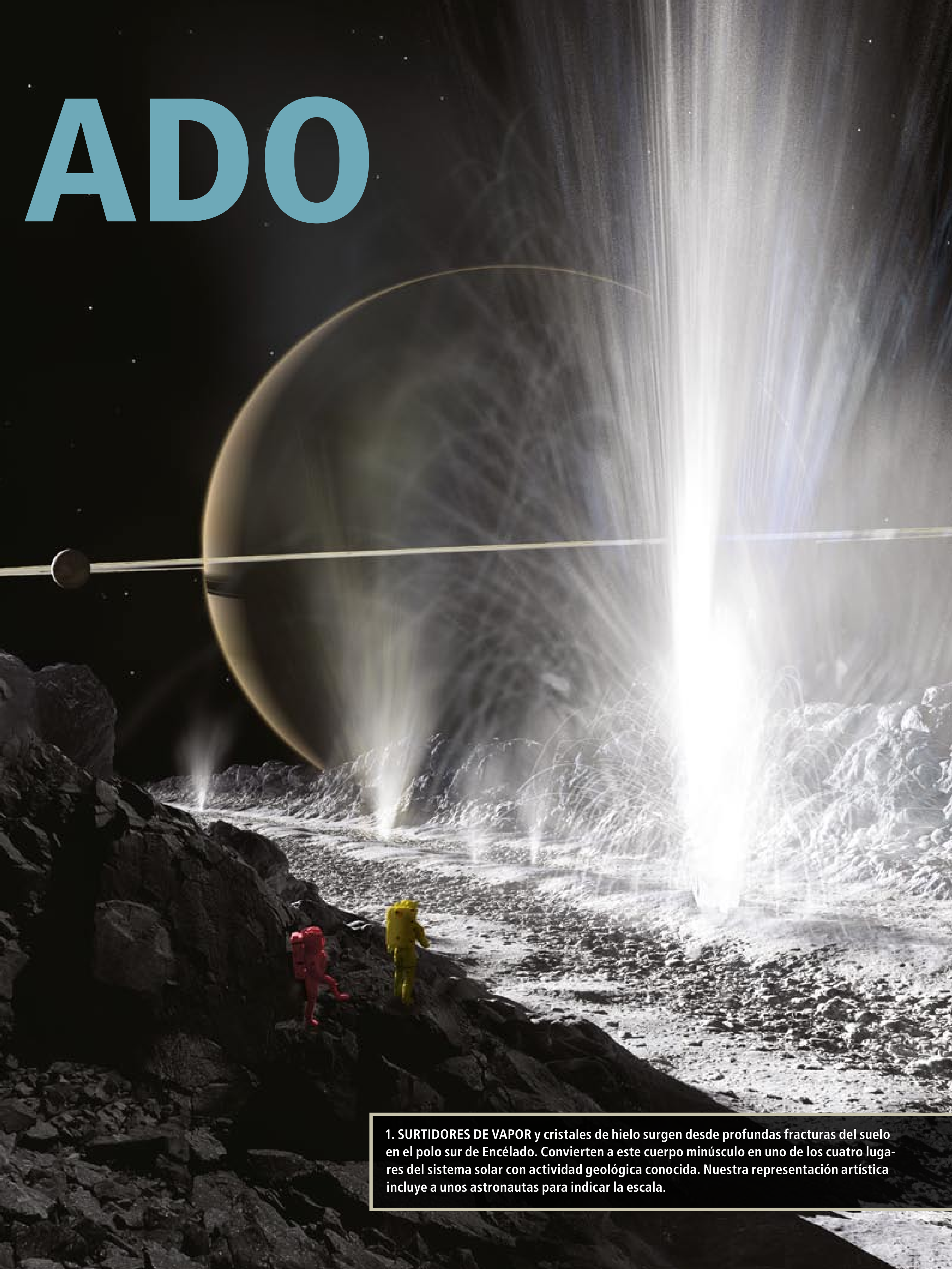
En este pequeño mundo de tectónica atormentada ha descubierto fenómenos con los que sueña cualquier explorador planetario. Encélado ha adquirido así una importancia que desborda la que debería corresponderle a un minúsculo cuerpo sumido en las profundidades de un grandioso sistema planetario. Energía, material orgánico y agua líquida: dispone de los tres requisitos de la vida que conocemos. En nuestra exploración de este mundo lejano hemos dado con un entorno que podría albergar seres vivos.

La lenta revelación de Encélado

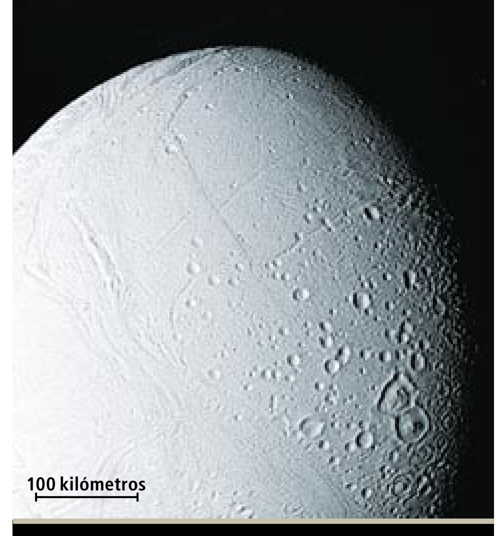
El primer indicio, no apreciado en su momento por todos, de que nos hallábamos ante algo muy importante surgió incluso antes del

RON MILLER

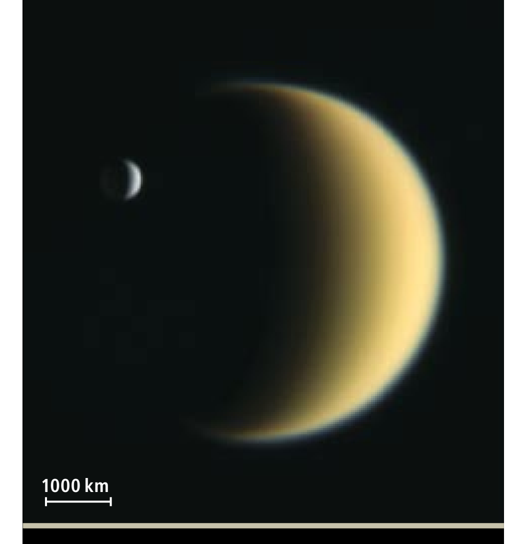
ADO



1. **SURTIDORES DE VAPOR** y cristales de hielo surgen desde profundas fracturas del suelo en el polo sur de Encélado. Convierten a este cuerpo minúsculo en uno de los cuatro lugares del sistema solar con actividad geológica conocida. Nuestra representación artística incluye a unos astronautas para indicar la escala.



2. EL PRIMER VUELO sobre Encélado, por la nave *Voyager 2* en 1981, produjo imágenes de mediocre resolución que no cubrían el planeta entero. Las regiones lisas indican actividad geológica en un pasado reciente.



3. ENCELADO (*a la izquierda del centro*) tiene la décima parte del tamaño de la mayor luna de Saturno, Titán. Los cuerpos de ese tamaño pierden rápidamente el calor interno: exceptuando a Encélado, en todos ha cesado la actividad geológica. ¿Qué mantiene activo a Encélado?

NASA/JPL/INSTITUTO DE CIENCIA ESPACIAL

encuentro cercano de *Cassini* con Encélado. En enero de 2005 nuestras cámaras fotografiaron la luna con el Sol detrás, una geometría que los astrónomos planetarios denominan "fase solar alta". Al igual que la fina capa de polvo sobre el parabrisas se hace mucho más visible cuando se conduce hacia el Sol, las partículas esparcidas por el sistema solar resaltan también más cuando se las observa de cara al Sol. Las observaciones con esa geometría resultaron muy fructíferas durante la misión *Voyager* —sacaron a luz estructuras difíciles de ver de los anillos y atmósferas de los planetas exteriores y sus lunas— y han sido clave en la investigación de Encélado.

En las imágenes de enero de 2005 se veía una fulguración que sobresalía del limbo del polo sur lunar. A los veteranos del *Voyager* nos recordó las columnas de fuego volcánico de Io, la luna volcánica de Júpiter, y las tenues brumas de la atmósfera de Tritón, satélite de Neptuno. Algunos miembros del equipo de investigación estaban convencidos de que la fulguración era una prueba definitiva de que emergía materia del polo sur; otros, más cautelosos, advirtieron de que ese rasgo podía no ser más que uno de esos molestos artefactos que aparecen con frecuencia cuando se observa con el Sol de frente.

Yo estaba indecisa. Por desgracia, todos parecíamos muy ocupados —proyectando las siguientes observaciones, escribiendo artículos científicos— para afrontar el análisis detallado que hubiera resuelto el problema. Sin más tiempo para comprobaciones, tomé la decisión de no informar al público; sabía muy bien lo embarazoso que hubiera sido anunciar el descubrimiento de una columna de material saliendo de la superficie de una luna, que se suponía que estaba geológicamente muerta, para admitir más tarde que se trataba de una mancha en la imagen. Por suerte, no tuvimos que esperar mucho.

Los dos primeros acercamientos de *Cassini* a Encélado, en febrero y marzo, la llevaron a sobrevolar el ecuador de la luna. Los resultados fueron espectaculares en ambas ocasiones. Las lisas llanuras que nos hizo ver el *Voyager* no eran lisas en absoluto. Presentan numerosas y finas fracturas de escala subkilométrica. Hay lugares donde se entrecruzan múltiples generaciones de fracturas y hendiduras, rectas o curvas. Otras partes de la superficie están roturadas por abismos de medio kilómetro de profundidad. A escalas más finas, una red delgada y oscura de grietas estrechas casi paralelas divide el terreno en losetas. Es obvio que Encélado ha sufrido múltiples episodios de actividad tectónica intensa en el pasado, de naturaleza dispar. Sus cicatrices lo prueban.

El vuelo de febrero proporcionó otra imagen de fase solar alta donde se veía una nueva fulguración, mucho más impresionante que la anterior. Además, el magnetómetro detectó que las líneas del campo magnético de Saturno se distorsionaba cuando la rotación del planeta las llevaba a pasar por Encélado, señal de que las líneas del campo recogieron iones pesados. La fuente de los iones resultó ser el polo sur de la luna. Los indicios se acumulaban: las imágenes que temíamos espurias empezaban a no parecerlo.

El equipo científico de la *Cassini* propuso a los gestores del proyecto que se rebajara la altura del acercamiento a Encélado de julio de 2005, de 1000 kilómetros a sólo 168, con el fin de poder inspeccionarlo mejor. Estuvieron de acuerdo. El 14 de julio la sonda sobrevoló las latitudes medias-altas del sur. Retransmitió

La autora

Carolyn Porco es la investigadora principal del equipo de imagen de *Cassini* y directora del Laboratorio Central de Operaciones de Imagen de Cassini (CICLOPS). Formó parte del equipo de imagen de la nave *Voyager* y desde 2001 a 2003 dirigió, en calidad de vicepresidenta, la Comisión para la Exploración Decenal del Sistema Solar, órgano de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, desde donde se fijan las prioridades de la ciencia planetaria.



4. OBSERVADO desde *Cassini*, Encélado pasa por delante de Dione, una luna mayor y más distante de Saturno, cuya gravedad contribuye indirectamente a la actividad de Encélado. En primer plano se aprecia la parte exterior de los anillos de Saturno.

por primera vez una imagen clara del polo sur: un paisaje asombroso, geológicamente muy diferente de cualquier otro estudiado en el sistema solar.

El polo sur se halla en una región más o menos circular, donde apenas si hay cráteres, surcada por unas grietas profundas y paralelas a las que hemos llamado "rayas de tigre". Están espaciadas casi por igual, se extienden a lo largo de unos 130 kilómetros y su punta se curva en forma de garfio. Entre las grietas se encuentran unas llanuras más brillantes que la media, surcadas por finas ranuras. La región entera está nítidamente demarcada en la latitud 55 grados sur por un serpenteante e ininterrumpido borde circumpolar formado por valles y montañas concéntricas. Los meandros de la frontera están espaciados unos 45 grados en longitud; algunos presentan largos surcos que se extienden casi desde el ecuador hasta las zonas sin cráteres.

La estructura y posición de las montañas y los valles le hacen pensar a Paul Helfenstein, de la Universidad de Cornell, asociado al equipo de imagen, que la frontera se formó al plegarse la superficie como consecuencia de una compresión horizontal a lo largo del eje norte-sur, que recuerda a la convergencia tectónica del Himalaya; cree también que la región encerrada por esta cadena es, en Encélado, el equivalente a la dorsal del Atlántico, un centro en expansión donde aparece nueva superficie que empuja a la ya existente.

Sin duda, el semblante de esta pequeña luna nos habla de sucesos del pasado, pero su presente, como estábamos a punto de descubrir, es aún más sensacional. Mientras rastreaba los aledaños de los terrenos del polo sur, el analizador de polvo de *Cassini* recogió partículas diminutas que parecían salir de la zona de las rayas de tigre. Otros dos instrumentos detectaron vapor de agua, y uno de ellos midió trazas de dióxido de carbono, nitrógeno y metano. La nave *Cassini* había atravesado una nube tenue.

Además, la cámara del infrarrojo térmico detectó temperaturas elevadas a lo largo de las fracturas, quizá de hasta 180 kelvin, por encima de los 70 kelvin que debería haber registrado si no hubiese habido más calentamiento que el de la luz solar. Esas zonas bombean la extraordinaria energía de 60 watt por metro cuadrado, mucho más que los 2,5 watt por metro cuadrado de calor generado en el área geotérmica de Yellowstone. Y es posible que algunos puntos de la superficie, más allá del poder de resolución del instrumento infrarrojo, estén más calientes.

Casi no podíamos creernos la fortuna de haber dado con un lugar tan fascinante. Con rapidez, el equipo de imagen planeó obtener una serie de fotografías en el plazo de cuatro meses —a finales de noviembre de 2005— con el fin de explorar de nuevo el polo sur con mayor resolución y alta fase solar. Mientras tanto, acumulamos un número suficiente de imágenes de las otras lunas tomadas en una fase parecida. Con la ayuda de los analistas de imágenes de mi grupo, demostré a los escépticos de nuestro equipo que en ellas no se observaba ninguna fulguración ni nada que se le pareciera: no cabía duda alguna de que en Encélado no estábamos viendo artefactos.

Nuestros días de indecisión habían terminado: la fulguración era un inmenso penacho, integrado por pequeñas partículas, que ascendía

BANCO DE DATOS: ENCELADO

Masa: **1,08** × **10**[20] kilogramos

Diámetro: **504** kilómetros

Densidad: **1,61** gramos por centímetro cúbico

Distancia orbital media desde Saturno: **238.037** kilómetros

Período orbital: **1,37** días

Excentricidad: **0,0047**

Inclinación respecto al plano ecuatorial de Saturno: **0,0083** grados.

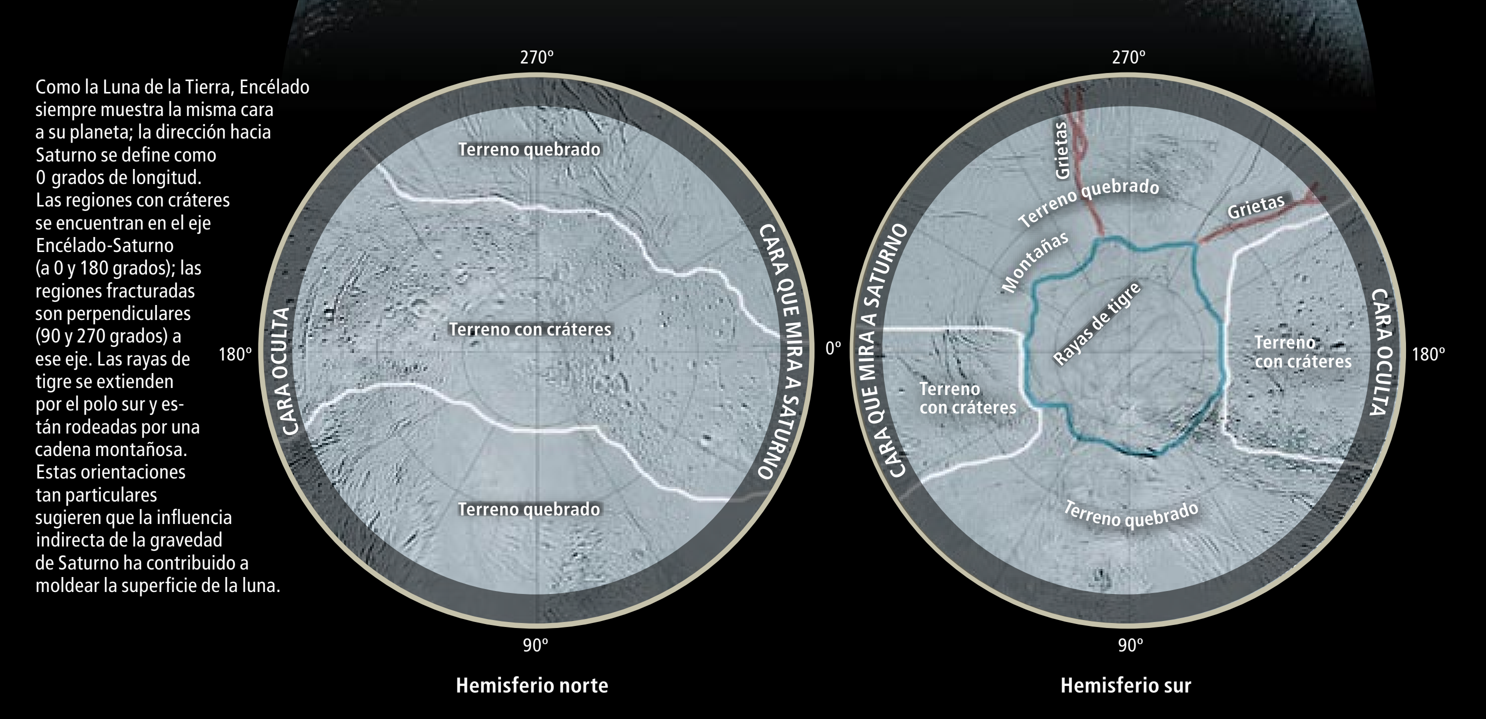
NASA/JPL/INSTITUTO DE CIENCIA ESPACIAL



5. EL HEMISFERIO SUR de Encélado nos lo descubrió en 2005 la nave *Cassini*. Este mosaico de imágenes presenta la superficie tal y como aparecería a nuestros ojos si pudiesen percibir la luz infrarroja y la ultravioleta (a simple vista la superficie es completamente blanca). Las "rayas de tigre" cercanas al fondo son hendiduras con actividad geológica y calientes; cruzan el suelo del polo sur. Su color azulado se debe a que están cubiertos de granos de hielo, mayores que la media, que absorben la luz infrarroja.

Las muchas caras de Encélado

Muy pocos científicos planetarios sospechaban que Encélado tuviera tal diversidad de terrenos. Gran parte del hemisferio norte, fotografiado por la nave *Cassini* (*arriba*) con una resolución seis veces mejor que la de *Voyager 2*, está cubierta con cráteres y, por tanto, tiene una antigüedad mayor que el terreno del polo sur, carente de cráteres. Pero las fracturas, pliegues, cordilleras y depresiones indican que los dos hemisferios han sufrido muchos cambios.



Como la Luna de la Tierra, Encélado siempre muestra la misma cara a su planeta; la dirección hacia Saturno se define como 0 grados de longitud. Las regiones con cráteres se encuentran en el eje Encélado-Saturno (a 0 y 180 grados); las regiones fracturadas son perpendiculares (90 y 270 grados) a ese eje. Las rayas de tigre se extienden por el polo sur y están rodeadas por una cadena montañosa. Estas orientaciones tan particulares sugieren que la influencia indirecta de la gravedad de Saturno ha contribuido a moldear la superficie de la luna.

NASA/JPL/INSTITUTO DE CIENCIA ESPACIAL

hasta una altura de varios cientos de kilómetros sobre el polo sur de la luna.

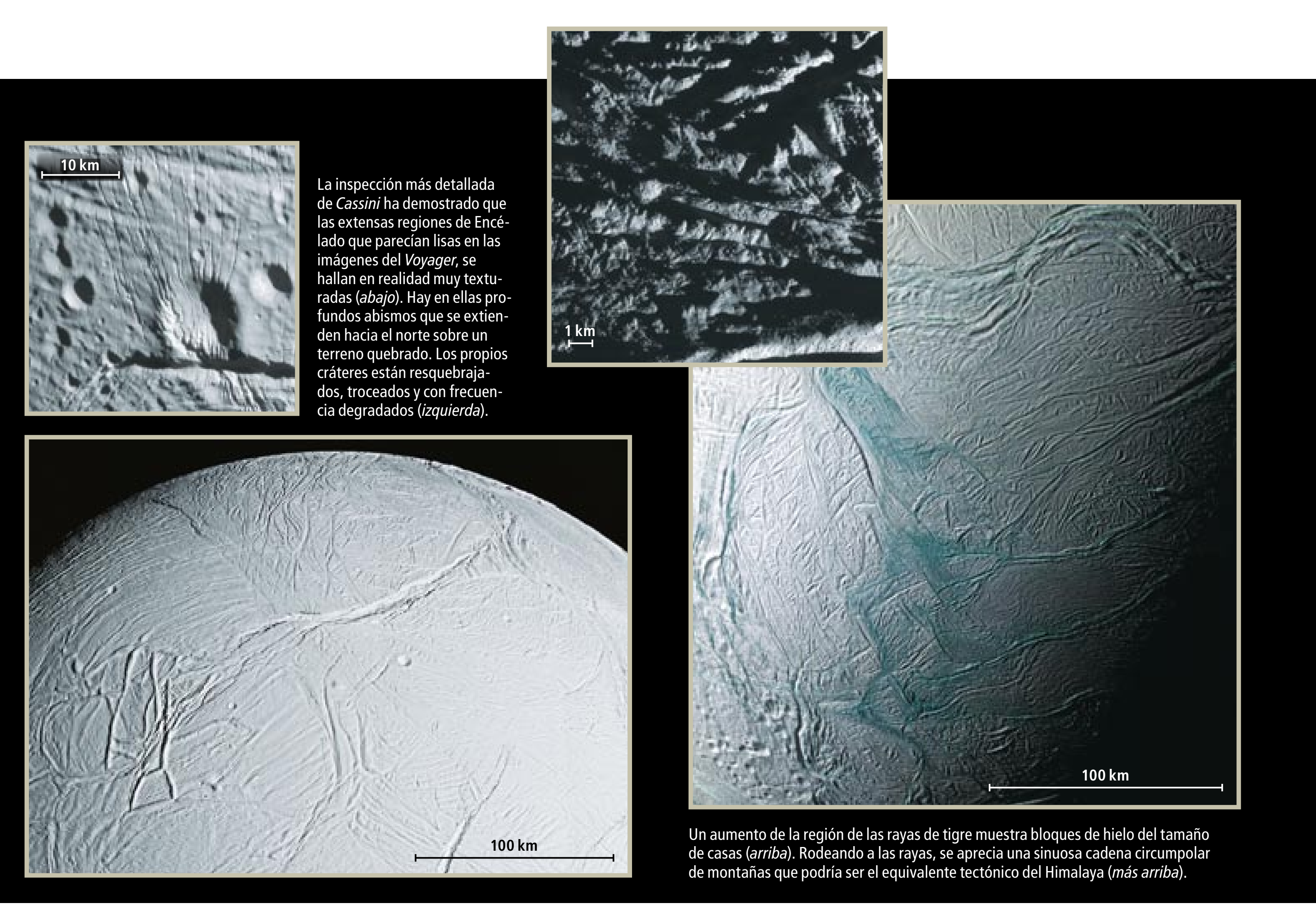
El 27 de noviembre recibimos la serie de impresionantes imágenes en blanco y negro de un Encélado creciente que mostraban, con toda nitidez, una docena o más de estrechas fuentes de diminutas partículas heladas que volaban hacia el espacio y alimentaban un penacho, débil pero gigantesco, sobre la región polar del sur. Un análisis posterior, obra de un miembro del equipo de imagen, Joseph Spitale, del Instituto de Ciencias Espaciales, y de mí misma demostró que las fuentes de las partículas coincidían con los lugares más calientes de las rayas de tigre. Era la primera prueba contundente de la conexión entre el calor y esas fumarolas. La mayoría de las partículas cae de nuevo a la superficie, pero algunas adquieren velocidad suficiente para entrar en órbita alrededor de Saturno; son las que crean el anillo más externo, el anillo E.

Sin lugar a dudas, estas imágenes constituyen un hallazgo espectacular: el indicio indiscutible de la existencia de actividad interna actual en una pequeña luna fría. ¡Cómo no sentir una afinidad con los primeros que vieron los géiseres de Yellowstone!

Avivar el calor

Los primeros artículos científicos sobre Encélado basados en datos de la nave *Cassini* se publicaron a principios de marzo de 2006. La luna se puso de moda. Desde entonces, *Cassini* la ha sobrevolado varias veces; ha ido penetrando en regiones más densas del penacho, a escasos 25 kilómetros de altura sobre la superficie. Durante uno de esos vuelos bajos, en marzo de 2008, *Cassini* refinó las mediciones del vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y metano, y descubrió trazas de compuestos de carbono, como el acetileno y el cianuro de hidrógeno, amén de trazas de etano, propano, benceno, formaldehído y otras sustancias orgánicas.

En el acercamiento de agosto, nuestras cámaras apuntaron a las fuentes superficiales de las emanaciones. El vuelo de la nave era tan rápido, que hubo que aplicar una técnica fotográfica especial de barrido para evitar las imágenes movidas. La ejecución fue perfecta. La secuencia de datos reveló que las rayas de



La inspección más detallada de *Cassini* ha demostrado que las extensas regiones de Encélado que parecían lisas en las imágenes del *Voyager*, se hallan en realidad muy texturadas (*abajo*). Hay en ellas profundos abismos que se extienden hacia el norte sobre un terreno quebrado. Los propios cráteres están resquebrajados, troceados y con frecuencia degradados (*izquierda*).

Un aumento de la región de las rayas de tigre muestra bloques de hielo del tamaño de casas (*arriba*). Rodeando a las rayas, se aprecia una sinuosa cadena circumpolar de montañas que podría ser el equivalente tectónico del Himalaya (*más arriba*).

tigre tienen profundidades de 300 metros, paredes en forma de V y bloques de hielo como casas desparramados por los flancos y sus alrededores. Los flancos parecen más lisos que un terreno medio de Encélado; posiblemente están cubiertos de mantos de nieve recién caída.

Un resultado inesperado: los alrededores inmediatos de las fumarolas no se distinguen apenas de otras zonas de las fracturas. Llegamos a la conclusión de que ninguno de esos conductos permanece activo mucho tiempo. Los tapones de hielo crecen por la condensación del vapor y los cierran antes de que puedan alterar el suelo de su entorno. En ese momento, la presión abre un nuevo conducto en algún otro lugar a lo largo de la fractura, que también se taponará, y así sucesivamente. Una película de larga duración mostraría la migración de los surtidores a lo largo de las fracturas.

Además de abrir una ventana a este impresionante fenómeno geológico, las imágenes han proporcionado mediciones precisas del tamaño y la forma de Encélado. Esta información, junto con su masa —determinada a partir de las perturbaciones gravitatorias que causa en la trayectoria de la nave *Cassini* durante los acercamientos—, ha revelado que Encélado es el satélite más rocoso de todas las lunas mayores de Saturno. Su densidad promedio de 1,6 gramos por centímetro cúbico implica que la roca representa el 60 % de la masa del satélite. Hay una alta probabilidad de que se concentre en un núcleo, rodeado de un manto de agua helada de varias decenas de kilómetros de espesor.

En la Tierra, la roca contiene sustancias radiactivas que producen calor. Lo mismo sucede en Encélado. Pero incluso toda esa roca que contiene es insuficiente para explicar el calor observado. La otra fuente verosímil de calor es el calentamiento por mareas. Al igual que la gravedad ejercida por el Sol y la Luna deforman ligeramente la Tierra y así generan las mareas, la gravedad de Saturno deforma Encélado. La luna, que no describe una órbita circular, ve variar su distancia de Saturno. Cuanto más cerca está del planeta, más se deforma. La variación diaria origina las flexiones y el calentamiento interno. La gravedad podría desempeñar un papel importante en la generación de las estructuras superficiales.



Los diminutos granos de hielo esparcidos por el espacio se aprecian mejor cuando el Sol los ilumina por detrás. Se observan montañas y valles a lo largo de la silueta.

Se puede localizar los surtidores en puntos concretos de las rayas de tigre. Curiosamente, estos puntos no difieren mucho, a simple vista, de otras partes de las rayas.

Las rayas de tigre tienden un ángulo de 45 grados con la dirección hacia Saturno, una orientación que se explica fácilmente con las fuerzas de marea.

La magnitud del calentamiento depende no sólo de la excentricidad orbital —el grado en que la órbita se desvía de un círculo perfecto—, sino también de la consistencia del interior de la luna. Un cuerpo rígido resistiría la deformación; un cuerpo elástico se deforma, pero no disipa energía en forma de calor. Una luna flexible de material viscoso cede y se calienta, igual que una luna en parte rígida, pero surcada por grietas, en la que las placas de hielo rozan unas con otras y generan calor por fricción. No tiene por qué haber un calentamiento uniforme por toda la luna. Puede concentrarse en la capa más exterior de hielo o en determinadas regiones externas, en las grietas por ejemplo.

El calentamiento por mareas tiende a mitigarse por sí solo. Se necesita tiempo para deformar el material de la luna, así que la distorsión está siempre desalineada con respecto a las fuerzas que la producen. El resultado es un par de torsión gravitatorio que altera el movimiento orbital y poco a poco va volviendo circular la órbita. Si cesan las fuerzas de marea, la luna adoptará una forma definitiva y el calentamiento se acabará. Encélado, sin embargo, se mantiene en una órbita elíptica debido a una resonancia con Dione, otro satélite de Saturno, mayor que Encélado. Por cada dos órbitas que Encélado completa, Dione describe una. Esta sincronización permite que los empujes gravitatorios periódicos de Dione actúen con coherencia y conserven la órbita no circular de Encélado.

No basta esta situación especial. Jennifer Meyer y Jack Wisdom, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han examinado la configuración orbital de Encélado y hallado que la cantidad de energía de marea que se le inyecta es sólo una quinta parte de la que sale de su polo sur. Este resultado no depende de cómo se disipe la energía de marea en el interior. Encélado, en su órbita actual, carece de la energía que explicaría la emisión de calor.

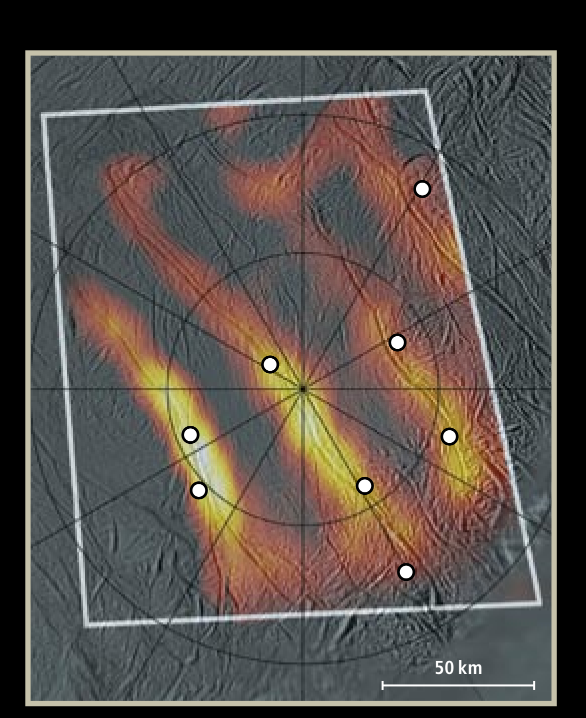
La luna de masilla

La paradoja se da sólo si se presupone que el calor de marea del Encélado de hoy ha de igualar su emisión actual de energía. ¿Y si Encélado está liberando el calor de un episodio de calentamiento pasado? Puede ocurrir, como analizaron ya en 1986 Greg Ojakangas y David Stevenson, del Instituto de Tecnología de California, que la órbita de un satélite y la consistencia de su interior se contrapongan, lo que lleva a una variación cíclica tanto de la excentricidad orbital como del calor emitido.

¿VIDA EN ENCELADO?

Encélado cuenta con tres de los ingredientes fundamentales de la vida: agua líquida, compuestos orgánicos y energía. ¿Ha contado con estos elementos el tiempo suficiente para que fragüe la vida? No se sabe cuánto tiempo se necesita. A juzgar por los registros geológicos, los microorganismos aparecieron en la Tierra muy temprano, según la vara de medir geológica: apenas transcurridos unos pocos cientos de millones de años tras las fases finales de la formación del planeta (o antes incluso).

NASA/JPL/INSTITUTO DE CIENCIA ESPACIAL



Un mapa térmico muestra temperaturas de hasta 180 kelvin a lo largo de las rayas, demasiado calor para que lo haya generado sólo el calentamiento solar. Los surtidores se originan en los puntos más calientes (*círculos blancos*).

Imaginemos que comenzamos con un Encélado rígido, frío y con una órbita casi circular. El ritmo del calentamiento por marea es bastante lento. Dione obliga a que aumente la excentricidad orbital, lo que provoca un mayor calentamiento por viscosidad y fricción en la capa de hielo. La excentricidad y el calentamiento siguen creciendo hasta que, en algún punto, el ritmo de calentamiento sobrepasa la capacidad de la luna de perder calor. Entonces empieza a subir la temperatura interna y el material del interior se ablanda y se hace menos rígido; hay un mayor calentamiento por marea.

En otro posible proceso oscilatorio, la luna se haría menos rígida, no porque se volviese más flexible, sino porque aparecerían grietas. Las fuerzas de marea romperían el hielo y causarían movimientos de cizalla. La fricción entre las superficies de las grietas disiparía la energía de marea y las calentaría.

En cualquier caso, la disipación de energía adicional del satélite hace que su órbita sea más circular. Con el tiempo, la tendencia se invierte: el calentamiento de marea disminuye hasta quedar por debajo del ritmo de pérdida de calor en la superficie; la luna comienza a enfriarse y, o bien el hielo se endurece de nuevo, o bien, en la segunda situación hipotética, se suturan las grietas. El ciclo, que puede durar decenas de millones de años, se itera.

Podríamos estar observando Encélado en un momento en que los flujos de calor interior y exterior no son constantes. En un modelo oscilante como éste, los flujos interior y exterior se equilibran sólo cuando se toma en cuenta el ciclo entero. En cualquier instante del mismo podríamos observar que el flujo exterior de calor de la luna se halla por encima o por debajo de la media y es superior o inferior al ritmo instantáneo de calentamiento.

Ojakangas y Stevenson han probado que en Io podría operar un ciclo controlado por la dependencia de la temperatura que tiene la viscosidad del hielo. Io, al igual que Encélado, presenta unos flujos de calor interior y exterior descompensados. Pero ese mecanismo no funciona en Encélado: Meyer y Wisdom han arribado a la conclusión de que no posee masa suficiente. El ciclo controlado por las grietas sí cabe dentro de lo posible, pero aún hay que investigarlo con más detalle.

¿Qué hay debajo?

Gabriel Tobie y sus colaboradores, de la Universidad de Nantes, han explorado otra explicación: que una zona de debilidad del polo sur pueda concentrar la energía de marea y mantenerla durante bastante tiempo. Simularon la respuesta de Encélado ante las fuerzas de marea, suponiendo que debajo del polo sur hubiera un sector de baja viscosidad, que haría que esa parte del satélite fuese más flexible que el resto. El modelo propuesto reproduce el calor emergente, aunque bajo dos condiciones que revolucionarían nuestra imagen actual de Encélado.

En primer lugar, el hielo de esa zona debería estar caliente —próximo a la temperatura de fusión— y, en segundo, debería haber una capa de líquido a presión entre la capa de hielo superficial y el interior rocoso. Esta capa cubriría el hemisferio sur. Sin ella, no sólo las flexiones y el calentamiento viscoso resultarían insuficientes, sino que el fenómeno tendería a ocurrir en el ecuador y no en el polo.

La idea de un océano bajo la superficie resulta muy convincente cuando se tiene en cuenta que el casco polar del sur de Encélado es una cuenca de medio kilómetro de profundidad, esculpida en la silueta general de la luna. Según Geoffrey Collins, de la Universidad Wheaton, y de Jason Goodman, del Instituto Oceanográfico de Woods Hole, la cuenca sería la expresión superficial de un mar subterráneo. El agua líquida es más densa que el hielo, por lo que habría un menor volumen total de agua en esa región. La región del polo sur sería un socavón colosal.

Es más, el océano podría aportar luz, siquiera indirecta, sobre la diversidad geológica de

¿POR QUE EL POLO SUR?

¿Por qué se ha concentrado la actividad geológica de Encélado en el polo sur? La casualidad podría ser la respuesta. O tal vez algo que sucedió en el pasado de la luna: el impacto de un meteorito, como los que crearon los gigantescos cráteres que se observan en Japeto y Tetis (otras lunas de Saturno), rompió o debilitó la capa exterior de hielo, concentrando allí la energía de marea. De ser así, la capa de hielo se habría deslizado, con el tiempo, en un proceso conocido como "deriva polar verdadera"; en tal caso, las fuerzas centrífugas habrían empujado las regiones de baja densidad hacia los polos. Paul Helfenstein, de la Universidad de Cornell, ha hallado indicios de dichos movimientos: la región Sarandib Planitia, próxima al ecuador, parece la versión erosionada del suelo del polo sur. Alguna vez pudo haber estado en el polo y haberse desplazado hasta su posición actual.

Encélado. Isamu Matsuyama, de la Institución Carnegie de Washington, y Francis Nimmo, de la Universidad de California en Santa Cruz, han demostrado que la posición y la orientación de los principales rasgos geológicos de la luna —las grietas norte-sur y las montañas circumpolares— evidencian un deslizamiento de la capa de hielo con respecto al eje de rotación. La luna se comporta a la manera de un giroscopio cuya capa exterior se moviese con libertad.

La misma idea puede elucidar por qué la región geológicamente activa se encuentra en el polo sur: una región caliente con una densidad inferior a la media deriva de manera natural hacia el eje de rotación. Y aún más, cualquier zona más caliente situada bajo el polo sur ascendería hasta la capa más quebradiza del hielo gracias a un movimiento convectivo, lo que daría razón de las propiedades del terreno del polo sur. Para que la capa de hielo pueda desplazarse de esa guisa se necesita una película líquida que haga que el hielo se desacople del interior más profundo.

La actividad de Encélado podría deberse a una combinación de todos los fenómenos mencionados. Si Encélado sufriera un ciclo de calentamiento debido a las grietas y si el ritmo al que las mareas deformaran la capa exterior del hielo fuese lo suficientemente rápido, las fracturas podrían propagarse por la dúctil región caliente subyacente, quizás hasta llegar al mar interior. El calentamiento por fricción de las fracturas contribuiría al calentamiento viscoso global del polo sur. El hielo podría deshacerse a lo largo de las grietas y su fusión aumentaría notablemente el calentamiento. A través de esa secuencia, podría el mar subterráneo regenerarse por sí mismo: la capa de arriba proporcionaría agua al mar de abajo. Mientras no se congele todo el océano durante la fase de enfriamiento del ciclo, el proceso continuará, siempre, eso sí, que Encélado guarde una órbita sincronizada con la de Dione.

Y por encima de todo, el agua líquida explica de manera natural las erupciones observadas. Michael Manga, de la Universidad de California en Berkeley, ha demostrado que la congelación parcial del mar subterráneo aumenta la presión y empuja el agua hacia arriba. Durante el ascenso disminuye la presión; los gases disueltos, entre ellos el dióxido de carbono, se separan de la disolución formando burbujas que, como sucede al agitar una botella de cava, ayudan a que el líquido suba aún más. Si el líquido terminara por alcanzar la superficie, tendríamos la respuesta a la pregunta de cómo llega a la superficie el calor generado en las profundidades: las corrientes de agua transportan muy bien el calor. También significaría que los surtidores observados son géiseres que se originan en las reservas líquidas subterráneas.

Encélado, ¿morada de vida?

Nos hallamos en una fase de depuración y contrastación de nuestras hipótesis sobre la historia de Encélado. En cualquier caso, parece inevitable que exista agua líquida en algún lugar bajo la superficie. Cabe, pues, la emocionante posibilidad de que dentro de esta pequeña luna haya un entorno con vida, o al menos con sus precursores. Todo lo que la vida necesita está allí: agua líquida, los elementos químicos requeridos y un exceso de energía. Las equivalencias del ecosistema de Encélado se encuentran en los estratos volcánicos subterráneos de la Tierra, donde circula agua líquida entre las rocas en completa ausencia

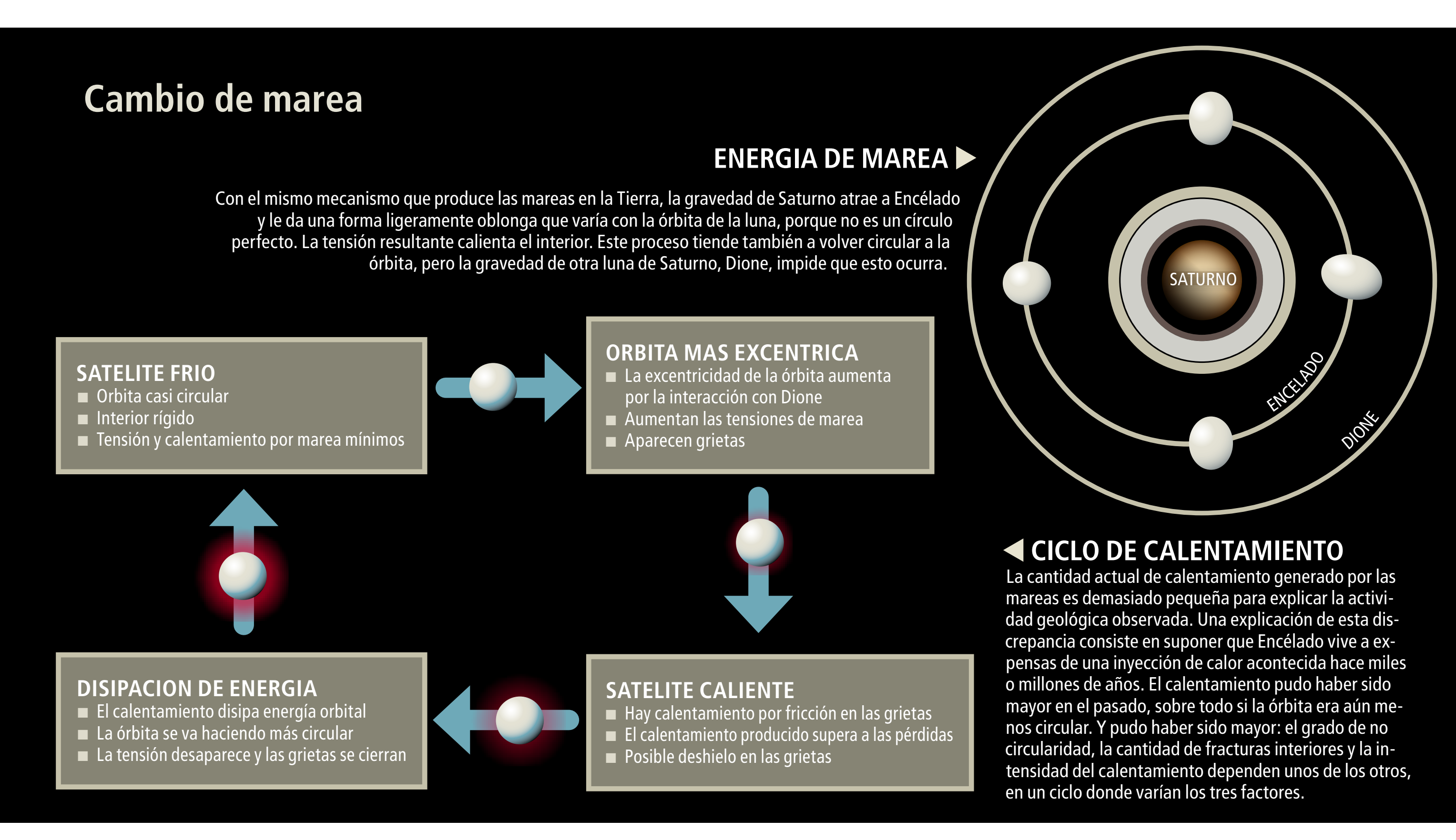
Un mundo de agua

Los surtidores y las altas temperaturas dan a entender que hay agua líquida subterránea en Encélado. Los surtidores escupen partículas de agua helada y vapor, y el intenso calor que los provoca parece necesitar agua líquida para facilitar que se deposite energía de marea de Saturno.

Encélado podría tener un núcleo rocoso rodeado de una gruesa capa de agua helada. La zona del polo sur es una depresión de medio kilómetro de profundidad en el semblante de la luna, quizás el resultado de un océano subterráneo. Las montañas circumpolares se extienden un kilómetro por encima de la superficie de la depresión.

Procedente de un mar líquido en la base de hielo, el agua sometida a presión, ayudada por gases disueltos, podría ascender hacia la superficie a través de una serie de profundas grietas y fumarolas. La fricción dentro de las grietas podría generar calor suficiente para deshacer el hielo. Corrientes de convección bajo el suelo del polo sur podrían estirar el terreno y crear las montañas circumpolares.

RON MILLER



MELISSA THOMAS

de la luz solar y de cualquier cosa producida por ella. En estos entornos se han hallado organismos que consumen hidrógeno o dióxido de carbono para crear metano, o hidrógeno y sulfatos; toman energía no del Sol, sino del calor interno de la Tierra.

El Encélado de hoy se parece mucho al niño de ayer. Apenas hemos empezado a reconstruir su pasado a partir de las preciosas pistas que se esparcen por su superficie. Surgen muchas preguntas que incluso *Cassini*, con la capacidad que tiene, no puede responder; preguntas que están y estarán fuera de nuestro alcance mientras no pongamos una nave, especialmente equipada, en órbita alrededor de la luna o que se pose en su superficie. Una sonda en órbita podría cartografiar la topografía y el campo gravitatorio de la luna para determinar la distribución interna de la masa; de ese modo podríamos detectar cualquier capa de agua subterránea. Una sonda que aterrizara podría, equipada con un sismómetro, registrar los movimientos de los líquidos subterráneos.

El coste total y el largo desarrollo de las misiones complejas implican que debemos ser muy selectivos a la hora de decidir qué visitamos. Muchos desean que se vuelva a Europa, porque este satélite de Júpiter encierra también un océano subterráneo que podría albergar vida extraterrestre [*véase* "El océano oculto de Europa", por Robert T. Pappalardo, James W. Head y Ronald Greeley; Investigación y Ciencia, diciembre de 1999]. A mi entender, sin embargo, la exploración de Encélado es más prometedora. Puesto que no se conoce ninguna fumarola en Europa, para dar con un ecosistema caliente en su interior habría que taladrar hasta grandes profundidades, una empresa tan ardua, que no se acometerá en el tiempo de nuestras vidas. Por el contrario, para explorar el interior de Encélado sólo se necesita volar a través de un penacho o aterrizar en el terreno del polo sur, mirar hacia arriba y sacar la lengua.

Además, puesto que la magnetosfera de Saturno es anémica, comparada con la de Júpiter, una nave espacial posada sobre Encélado o que gire a su alrededor no habría de lidiar con un campo de radiación tan severo como el que se encontraría en Europa. Por fin, un viaje a Encélado permitiría la exploración conjunta de Titán, otro destino en Saturno que quizá cobije los comienzos químicos de la vida [*véase* "El metano en Marte y Titán", por Sushil K. Atreya; Investigación y Ciencia, julio de 2007].

Por ahora, nos complace saber que la primera exploración humana de Saturno y su séquito de mundos ha descubierto una maravilla en el casquete sur de una pequeña y enigmática luna: un lugar fantástico y turbulento, de profundos abismos helados y altísimos y fantasmagóricos surtidores. Como exploradores planetarios, no podríamos haber pedido más.

Bibliografía complementaria

CASSINI OBSERVES THE ACTIVE SOUTH POLE OF ENCELADUS. C. C. Porco y col. en *Science*, vol. 311, págs. 1393-1401; 10 de marzo, 2006.

CASSINI: THE FIRST ONE THOUSAND DAYS. Carolyn C. Porco en *American Scientist*, vol. 95, n.º 4, págs. 334-341; julio/agosto, 2007.

SOLID TIDAL FRICTION ABOVE A LIQUID WATER RESERVOIR AS THE ORIGIN OF THE SOUTH POLE HOTSPOT ON ENCELADUS. G. Tobie, O. Cadek y C. Sotin en *Icarus*, vol. 196, n.º 2, págs. 642-652; agosto, 2008.

THE POSSIBLE ORIGIN AND PERSISTENCE OF LIFE ON ENCELADUS AND DETECTION OF BIOMARKERS IN THE PLUME. C. P. McKay y col. en *Astrobiology*, vol. 8, n.º 5, págs. 909-922; octubre, 2008.

UNA NUEVA BIOMOLECULA

El ácido peptidonucleico, un híbrido sintético de proteína y ADN, podría constituir la base de un nuevo tipo de fármacos y de formas de vida artificial

Peter E. Nielsen

La extraordinaria diversidad de seres que habitan el planeta, desde las diminutas bacterias hasta las majestuosas ballenas azules, desde las plantas que captan la luz solar hasta los endolitos que digieren minerales a grandes profundidades, se funda en una única "forma de vida". Todos esos organismos se basan en los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y en las proteínas, que colaboran según los dictados del dogma central de la biología molecular: el ADN almacena la información que se transcribe en ARN, que sirve luego de molde para la síntesis de proteínas. A su vez, las proteínas desarrollan funciones estructurales en los tejidos y, mediante su actividad enzimática, constituyen la mano de obra de la célula.

Sin embargo, los científicos sueñan con crear algún tipo de vida ajeno a éste. El objetivo es doble: comprender mejor los componentes mínimos necesarios para la vida (lo que arrojaría luz sobre aspectos esenciales de la vida y sobre el origen de la vida en la Tierra) y descubrir si son capaces de hacerlo. En otras palabras, se han propuesto combinar un nuevo conjunto de moléculas con capacidad de autoorganización, metabolización (hacer uso de una fuente de energía), crecimiento, reproducción y evolución.

Una de las moléculas candidatas es el ácido peptidonucleico (APN). Al igual que el ADN y el ARN, el APN almacena información; sin embargo, se construye a partir de un esqueleto similar al de las proteínas, más sencillo y resistente que el esqueleto azúcar-fosfato de los ácidos nucleicos. En nuestro grupo de investigación desarrollamos el APN hace más de 15 años, en el transcurso de un proyecto que tenía como objetivo algo más útil a corto plazo que la creación de formas de vida novedosas. Queríamos diseñar fármacos que operasen sobre el ADN de determinados genes, bien para bloquear la expresión del gen, bien para intensificarla (es decir, síntesis de la proteína codificada por el gen). Ese tipo de fármacos sería conceptualmente similar a los compuestos "antisentido" como las hebras cortas de ADN o de ARN que se unen a una secuencia concreta del ARN para obstaculizar la producción de proteínas relacionadas con enfermedades.

Las propiedades únicas del APN le confieren varias ventajas sobre los ADN y los ARN antisentido: mayor versatilidad a la hora de unirse al ADN y al ARN, unión más fuerte a su molécula diana y mayor estabilidad química en un ambiente celular plagado de enzimas. Muchos estudios han demostrado la idoneidad del APN a la hora de modificar la expresión génica, sobre todo en experimentos moleculares realizados *in vitro* o con cultivos celulares. Han comenzado ya los estudios sobre animales y las investigaciones encaminadas a encontrar formas de convertir el APN en fármacos que, a través del sistema circulatorio, entren en las células del paciente.

Además de promover una apasionante investigación médica, estas moléculas han dado lugar a especulaciones sobre el origen de la vida en la Tierra. Algunos han sugerido que el APN, o una molécula semejante, podría haber sentado las bases para una forma precoz de vida, previa a la evolución de las proteínas, el ADN y el ARN. Es posible que quienes investigan sobre formas de vida artificial, en vez de crear una nueva forma de vida recreen nuestros ancestros primordiales.

CONCEPTOS BASICOS

- Una molécula sintética, el ácido peptidonucleico (APN), combina la capacidad de almacenar información del ADN con la estabilidad química de un esqueleto semejante al que poseen las proteínas.
- Los fármacos basados en APN operarían mediante la unión a determinadas secuencias de bases de ADN o de ARN, lo que causaría el silenciamiento o la activación del gen correspondiente.
- Quienes trabajan en la creación de vida artificial a partir de mezclas de compuestos químicos están considerando el APN como un componente útil para sus diseños.
- En el origen de la vida, moléculas semejantes al APN podrían haberse utilizado como material genético primordial.



1. EL ACIDO PEPTIDONUCLEICO (*dorado*) penetra en el surco mayor del ADN. Origina estructuras de tres hebras y, con ello, altera la actividad génica.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

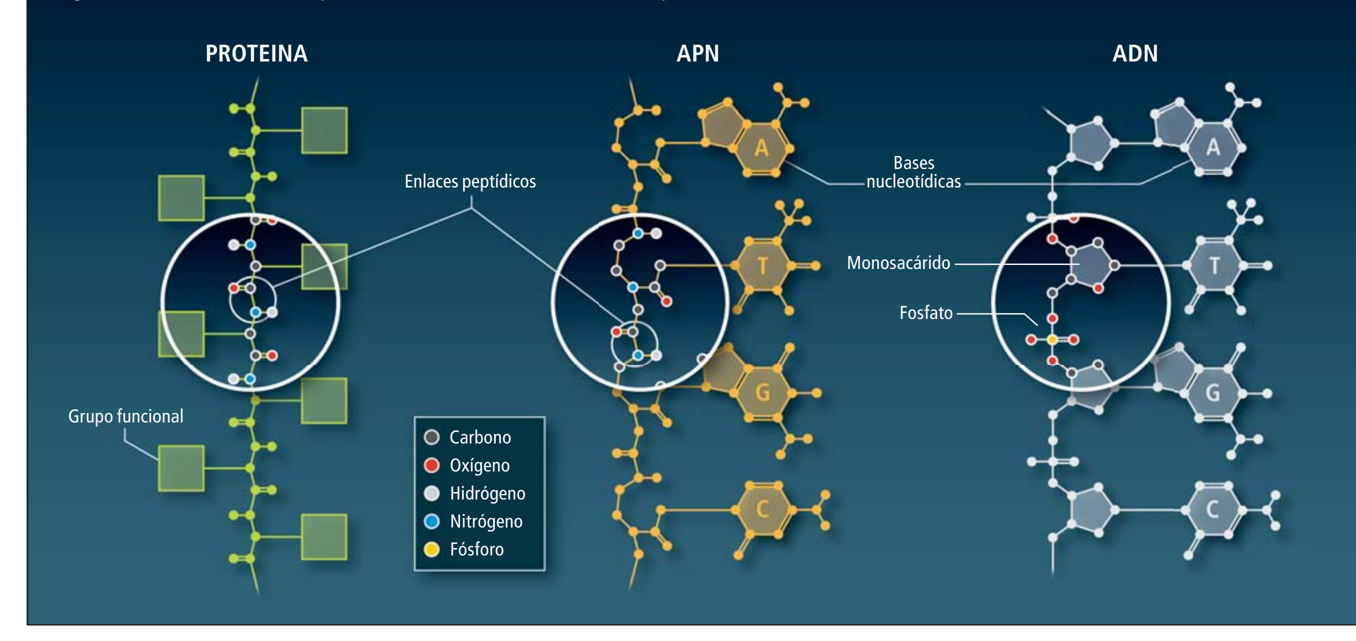
Reconocimiento de dobles hebras

La historia del descubrimiento del APN comienza a principios de los años noventa del siglo pasado. Para obtener fármacos con mayores prestaciones que los ARN antisentido, Michael Egholm, Rolf H. Berg, Ole Buchardt y el autor se propusieron desarrollar moléculas pequeñas que reconocieran un ADN de doble hebra (dúplex de ADN) con una secuencia de bases concreta. Una tarea nada fácil. La dificultad principal estribaba en la estructura de doble hélice del ADN.

En el ADN, las bases timina (T), adenina (A), citosina (C) y guanina (G) almacenan la información. En el ARN, la timina se sustituye por una molécula muy parecida, el uracilo (U). Estas bases se emparejan mediante puentes de hidrógeno y forman los "peldaños" de la famosa "escalera" de ADN. C se empareja con G; A con T. Dan así lugar a emparejamientos de

APN: UN HIBRIDO DE PROTEINA Y ADN

El ácido peptidonucleico (APN) reúne características de las proteínas y del ADN. El esqueleto del APN consta de unidades simples engarzadas mediante enlaces peptídicos, igual que en una proteínas, y difiere del esqueleto azúcar-fosfato del ADN, menos estable y dotado de carga eléctrica negativa. Cada unidad de APN porta una base nucleotídica, lo mismo que en una hebra de ADN.



TOMMY MOORMAN

bases de tipo Watson y Crick. Un compuesto que se una a un segmento de la doble hélice de ADN con una secuencia de bases concreta podría, por tanto, actuar sobre cualquier gen que contuviera esa misma secuencia de bases en cualquiera de sus hebras.

La tarea de reconocimiento resulta fácil si el objetivo corresponde a una secuencia de bases determinada en un ADN o en un ARN de hebra sencilla. Si dos hebras de ácido nucleico poseen secuencias complementarias, éstas se unen entre sí (por emparejamiento de bases) como si de una cremallera se tratara. Si uno conoce la secuencia de un gen (a partir de los datos del Proyecto Genoma Humano, por ejemplo), para conseguir una molécula que se una a cierta región del gen que se halle en forma de hebra sencilla basta con sintetizar la secuencia complementaria.

En el ADN de doble hebra, en cambio, el reconocimiento de una secuencia entraña mayor dificultad porque los átomos implicados en los emparejamientos de tipo Watson y Crick participan en los puentes de hidrógeno que conectan las dos hebras entre sí y, por tanto, no están disponibles para enlazarse con otra molécula. A pesar de ello, las células contienen numerosas proteínas reguladoras que reconocen secuencias del dúplex de ADN para llevar a cabo su función controladora de la expresión génica. La hazaña resulta, por tanto, factible. Si mi grupo descubriera moléculas con capacidad para realizar la tarea, cabría, en potencia, que operaran como fármacos reguladores de genes.

La expresión génica se desarrolla en dos etapas. Primero, en la transcripción, una enzima sintetiza un ARN mensajero (ARNm): una hebra de ARN que contiene una copia de la secuencia de bases de una de las hebras de la hélice de ADN. El ribosoma, una máquina molecular formada por ARN y proteínas, realiza la segunda etapa: la traducción del ARNm en la proteína codificada por el gen. Los agentes antisentido se interponen en la traducción y se unen al ARNm. Se trata de pequeñas moléculas de ARN o de ADN modificadas químicamente, con la secuencia apropiada para que puedan identificar a su ARNm diana mediante emparejamientos de bases de tipo Watson y Crick. Al unirse al ARNm, el agente puede activar enzimas que degradan el ARN u obstruir el funcionamiento del ARNm.

Para controlar la expresión génica en la etapa de transcripción, las células recurren a los factores de transcripción, proteínas que reconocen secuencias específicas del ADN de doble hebra. Tales proteínas reprimen un gen mediante la obstaculización de la enzima ARN polimerasa (sin cuya interferencia transcribiría la secuencia de ADN en un ARNm) o lo activan ayudando a la ARN polimerasa en su unión con el ADN e iniciar la transcripción.

Aunque las proteínas en cuestión ofrecen un modelo de moléculas con capacidad de "leer" la secuencia de ADN desde el exterior de la

El autor

Peter E. Nielsen dirige el centro de reconocimiento biomolecular del departamento de medicina celular y molecular de la Universidad de Copenhague. Uno de los inventores del ácido peptidonucleico, ha participado en la creación de dos compañías danesas de biotecnología (Pantheco y APN Diagnostics, integradas hoy en Santaris y Applied Biosystems, respectivamente).

hélice, en los años noventa los bioquímicos todavía no podían diseñar una proteína que reconociera una secuencia dada. Una proteína reguladora de genes reconoce su secuencia de ADN porque posee la forma y composición química adecuadas para unirse a la secuencia en el surco mayor del ADN, mediante la cual se accede a los pares de bases situados a lo largo del eje central de la doble hélice. Pero la conformación de una proteína depende del plegamiento de su secuencia aminoacídica, un proceso que los investigadores no han logrado modelar todavía.

Desde entonces se han registrado algunos progresos, siguiendo la pista de proteínas de regulación génica que presentan dominios en "dedo de zinc": segmentos de unos 30 aminoácidos que se pliegan en torno a un ion de zinc; forman una estructura característica digitiforme que se acomoda en el surco mayor de ADN, de modo que algunos aminoácidos se encuentran alineados con las bases del ADN. Se han sintetizado proteínas artificiales con dedos de zinc, pero sigue resultando difícil programar una secuencia de aminoácidos que reconozca una secuencia de ADN, por corta que sea.

Un hallazgo que se remonta hasta 1957, sólo cuatro años después del descubrimiento de la doble hélice del ADN, proporciona un nuevo enfoque. Fue por entonces cuando Gary Felsenfeld, Alexander Rich y David Davies, del Instituto Nacional de Salud Mental, crearon estructuras en forma de triple hélice, en las que una hebra de ácido nucleico se colocaba a lo largo del surco mayor de una molécula dúplex de ácido nucleico. Para unirse, la hebra extra utilizaba un tipo de enlace distinto de los pares de bases T-A y C-G. Denominado "emparejamiento de tipo Hoogsteen", en honor de Karst Hoogsteen, cada posición a lo largo de la triple hélice contenía un triplete de bases en el que una T se unía a un par T-A (T-A=T, donde "=" indica el emparejamiento de bases de tipo Hoogsteen) o una C se unía a una unidad C-G (C-G=C). Sin embargo, esa estructura se formaba sólo cuando la hebra supernumeraria correspondía a una homopirimidina, una molécula formada sólo con C y T (o U, en el caso del ARN), ya que cada emparejamiento de bases de tipo Hoogsteen requiere la presencia de una G o una A en una de las hebras de la doble hélice.

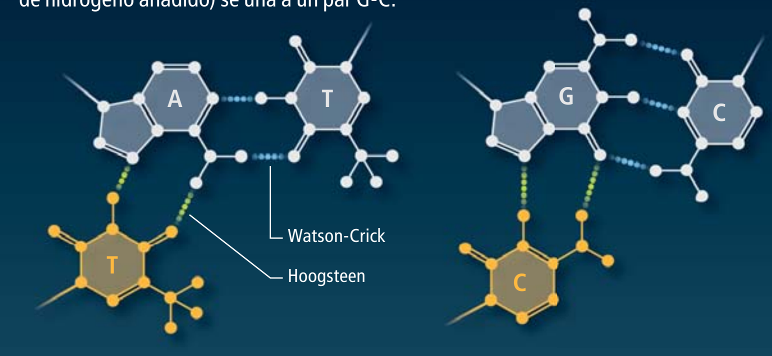
En 1987, Claude Hélène, del Museo Nacional de Historia Natural de París, y Peter B. Dervan, del Instituto de Tecnología de California, demostraron de forma independiente que podía aprovecharse la estructura de la triple hélice para diseñar oligonucleótidos (hebras de ADN con una longitud de unos 15 nucleótidos) que leían la secuencia del ADN de

RECONOCIMIENTO DEL ADN

El APN se une al ADN o al ARN mediante emparejamientos de tipo Watson y Crick entre bases complementarias (como ocurre en el ADN normal de doble hebra, o dúplex) o mediante emparejamientos de tipo Hoogsteen. Este proceder le capacita para crear estructuras diversas y abre múltiples vías para que el APN opere, en el interior de la célula, como un fármaco.

EMPAREJAMIENTO DE BASES

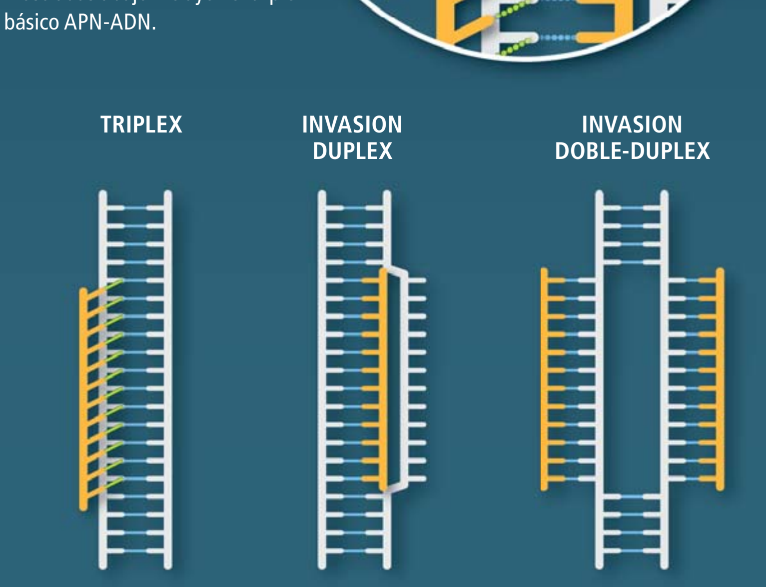
Los emparejamientos de tipo Watson y Crick (*azul*) enlazan las bases complementarias A y T (*izquierda*) y G y C (*derecha*). Los emparejamientos de tipo Hoogsteen (*verde*) permiten que una T (*izquierda*, *naranja*) se una a un par A-T o que una C (con un átomo de hidrógeno añadido) se una a un par G-C.



ESTRUCTURAS APN-ADN

Una estructura de particular interés y que posee algunos efectos biológicos potencialmente útiles es la "invasión tríplex" (*derecha*), en la que dos hebras de APN (*naranja*) desplazan a una de las hebras del dúplex de ADN para formar con la otra una estructura de tres hebras (tríplex). Las otras estructuras mostradas abajo incluyen el tríplex básico APN-ADN.

INVASION TRIPLEX



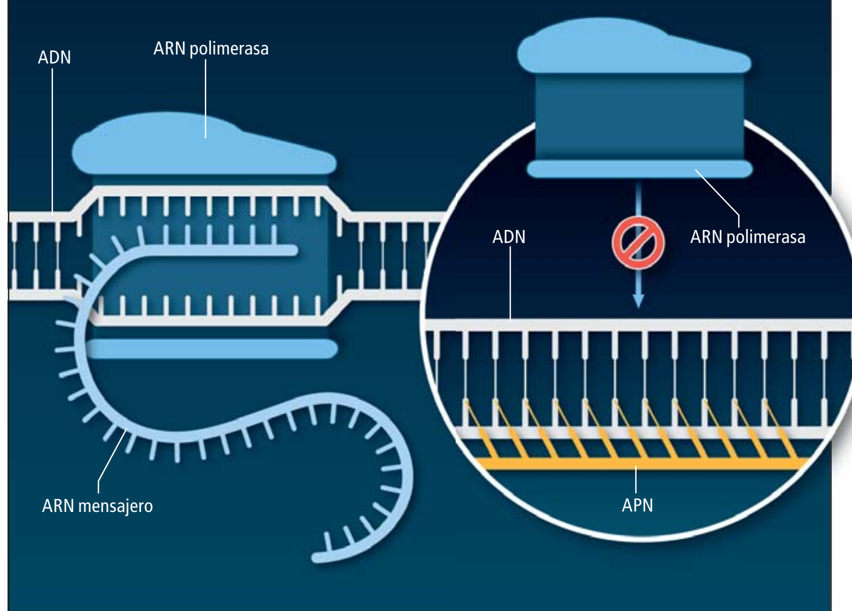
TOMMY MOORMAN

REGULACION GENICA

La capacidad del APN para unirse al ADN de doble hebra o al ARN le permite modificar, de diversas maneras, la síntesis de proteínas codificadas por determinados genes.

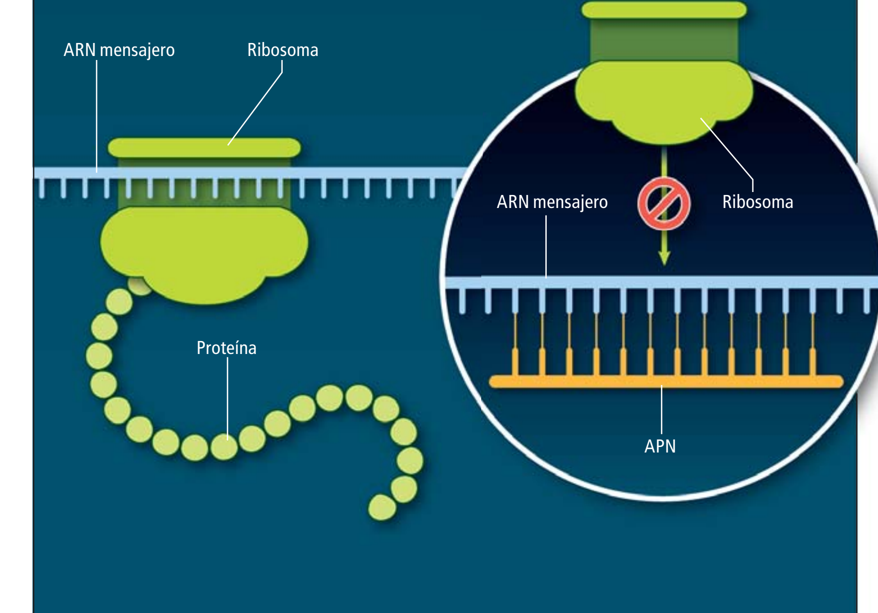
CONTROL DE LA TRANSCRIPCION

En la etapa de transcripción, una enzima (ARN-polimerasa) transcribe en una molécula de ARN mensajero la información codificada en una molécula de ADN. El APN bloquea el proceso al engarzarse a parte del gen que se va a transcribir. Cabe la posibilidad de que una invasión tríplex por parte del APN promueva la transcripción, mediante la exposición del segmento adecuado de ADN de hebra sencilla a las enzimas que inician la transcripción (*no se muestra*).



BLOQUEO DE LA TRADUCCION

En la segunda etapa de la síntesis de proteínas, un ribosoma traduce la secuencia del ARN mensajero en una secuencia de aminoácidos, formando la proteína. El APN obstaculiza esta etapa mediante la unión al ARN mensajero.



TOMMY MOORMAN

doble hebra y se unían a su secuencia diana complementaria mediante emparejamientos de tipo Hoogsteen.

Invasión del ADN

Inspirados por esa lectura digital del ADN de doble hélice mediante la unión de una molécula al surco mayor (los oligonucleótidos que forman triples hélices), nuestro grupo acometió la síntesis de una molécula que realizara con menos limitaciones la misma tarea. Esperábamos encontrar moléculas que no se limitasen a reconocer secuencias formadas exclusivamente por G y A. Queríamos que nuestra molécula fuera neutra. El esqueleto de los ácidos nucleicos contiene grupos fosfato que, en disolución, portan una carga eléctrica negativa. La repulsión que estas cargas negativas provocan entre los tres esqueletos debilita la unión de la tercera hebra a la triple hélice (tríplex).

Decidimos, por tanto, basar nuestro diseño en la química del grupo amida: se introdujo el mismo tipo de unión que enlaza a los aminoácidos en las proteínas. Las técnicas experimentales que utilizaban enlaces amida (o, en este caso, enlaces peptídicos) eran bien conocidas. Permitían sintetizar moléculas neutras muy estables. La molécula de ácido peptidonucleico resultante posee un esqueleto parecido al de los péptidos, formado por una unidad repetitiva más sencilla que el azúcar y el fosfato presentes en el ADN o en el ARN. Cada unidad puede hallarse unida a una base nucleotídica estándar (T, A, C o G) o a bases que se han modificado por alguna razón poderosa. A lo largo del APN, el intervalo entre bases es muy parecido al del ADN o ARN; ello permite que hebras cortas de APN (oligómeros de APN) formen estructuras dúplex muy estables, bien con hebras de ADN o de ARN, bien con otra hebra de APN. Las bases se unen entre sí mediante enlaces de tipo Watson y Crick.

Para nuestra sorpresa, cuando intentamos utilizar un dúplex de ADN como diana para un APN homopirimidínico, el APN no se unió al surco mayor del ADN según lo previsto. Antes bien, una hebra de APN invadió la hélice, desplazando a una de las hebras del ADN para crear pares de bases de tipo Watson y Crick con su complementaria; una segunda hebra de APN formó enlaces de tipo Hoogsteen, generando una triple hélice (o tríplex) APN-ADN=APN. El segmento de ADN de hebra sencilla desplazado formó un "bucle P" que discurría paralelo a lo largo del tríplex.

Este modo de unión, la "invasión tríplex", entraña varias consecuencias de interés biológico: el tríplex es muy estable y el bucle P afecta a procesos biológicos fundamentales como

la transcripción, la replicación del ADN y la reparación génica. Así, la estructura del bucle P inicia la transcripción del ADN en ARN. El propio bucle creado por una hebra sencilla se emplea en el protocolo de diagnóstico de trastornos genéticos: en la etapa inicial de amplificación del ADN de la muestra (obtención de un gran número de copias), el bucle sirve de punto de anclaje específico donde iniciar el proceso de copia.

Pueden también desarrollarse otros tipos de unión, según la secuencia del ADN diana y el modo en que se hayan modificado las bases del APN. De entre ellos, reviste especial interés la "invasión doble-dúplex". En este caso, se preparan dos oligómeros de APN pseudocomplementarios, es decir, sus bases se modifican lo suficiente como para evitar la formación de un dúplex APN-APN, pero no hasta el punto de poder evitar que, de forma individual, se puedan unir a una hebra complementaria de ADN normal. Así, el APN invade la doble hebra de ADN y crea dos dúplex APN-ADN. A diferencia de la formación del tríplex, que requiere de un segmento largo de purinas (A y G) en el ADN diana, la unión "invasión doble-dúplex" es menos exigente en lo que atañe a la secuencia: con la técnica actual, la secuencia diana debe contener al menos un 50 por ciento de pares de bases A-T. Restricciones que se relajarían más todavía con el descubrimiento de las formas modificadas apropiadas de las bases G y C.

Mediante esos mecanismos, el APN se une a las moléculas complementarias de ARN o de ADN con mayor especificidad y afinidad que el ADN. Así, los oligómeros de APN con grupos fluorescentes incorporados pueden utilizarse a modo de sondas para detectar genes específicos en tests diagnósticos. Pensemos en los análisis de hibridación fluorescente *in situ*, que resaltan la posición cromosómica de determinadas secuencias.

Aplicación farmacológica

Muchos estudios, realizados en cultivos celulares y en tubos de ensayo, han demostrado la viabilidad del uso de oligómeros de APN para activar o suprimir la transcripción, la replicación o la reparación de determinados genes mediante la unión al ADN. Se han publicado también numerosos experimentos que demuestran que los oligómeros de APN operan, en cierto modo, igual que la interferencia por ARN antisentido: inhiben la expresión génica en la etapa de traducción, en cultivos celulares y en ciertos trabajos sobre ratones.

El APN consigue tales efectos mediante el bloqueo físico de procesos clave en los que interviene el ARN. Por el contrario, los oligómeros de ADN o de ARN utilizados en la interferencia por ARN cuentan con la ayuda de enzimas celulares que destruyen los dúplex ARN-ADN o ARN-ARN constituidos. Es poco probable que la estructura APN-ARN reciba ese tipo de ayuda, porque las enzimas no reconocen esta estructura extraña (aunque, hasta la fecha, se ha estudiado la cuestión sólo en el caso de una de las enzimas pertinentes). Sin embargo, la extraña naturaleza de los oligómeros de APN les dota también de una estabilidad extraordinaria en el medio biológico: puesto que las enzimas que destruyen otros péptidos no los reconocen, los APN disponen de más tiempo para encontrar un ARN complementario e inutilizarlo.

En algunos casos, el bloqueo de un proceso en el que participa el ARN provoca la restauración de una proteína sana. El grupo encabezado por Matthew Wood, de la Universidad de Oxford, demostró en 2007 que puede utilizarse el APN con este fin. Cuando inyectaron APN en ratones con distrofia muscular, los músculos inyectados mostraron niveles superiores de distrofina, cuya ausencia provoca la distrofia muscular. El APN evitaba que un segmento erróneo del gen de la distrofina se tradujese de ARN a proteína, eliminando así la mutación debilitante del fragmento, al tiempo que dejaba intacta una región de la distrofina de tamaño suficiente para cumplir su función.

Los oligómeros de APN y los ácidos desoxirribonucleico y ribonucleico comparten un problema: su escasa biodisponibilidad. Se trata de moléculas de gran tamaño y en su mayoría hidrofílicas (solubles en agua), lo que dificulta su entrada en las células, cuya pared está formada por una membrana lipídica hidrofóbica. A pesar de la estabilidad de los APN, no permanecen mucho tiempo en un animal ya que son rápidamente excretados por la orina por su propio carácter hidrofílico. En un ratón, la mitad del APN desaparece en menos de media hora. Por tanto, la llegada de fármacos basados en APN debe aguardar a que se desarrollen modificaciones químicas adecuadas o formulaciones farmacéuticas (mezclas con otras sustancias) que mejoren la biodisponibilidad del APN. De hecho, el objetivo principal de la farmacología genética consiste en resolver el problema de acceso del fármaco al interior de las células. Los expertos creen que ese escollo constituye el postrer obstáculo que, hasta la fecha, impide avanzar con decisión en ese terreno.

Vida artificial

Al conectar el ámbito de los ácidos nucleicos con el de las proteínas, el APN podría operar

UTILIDAD TERAPEUTICA

En múltiples investigaciones ha quedado demostrado que los oligómeros de APN afectan a procesos biológicos en un cierto sentido y, con ello, evidencian un potencial interés terapéutico.

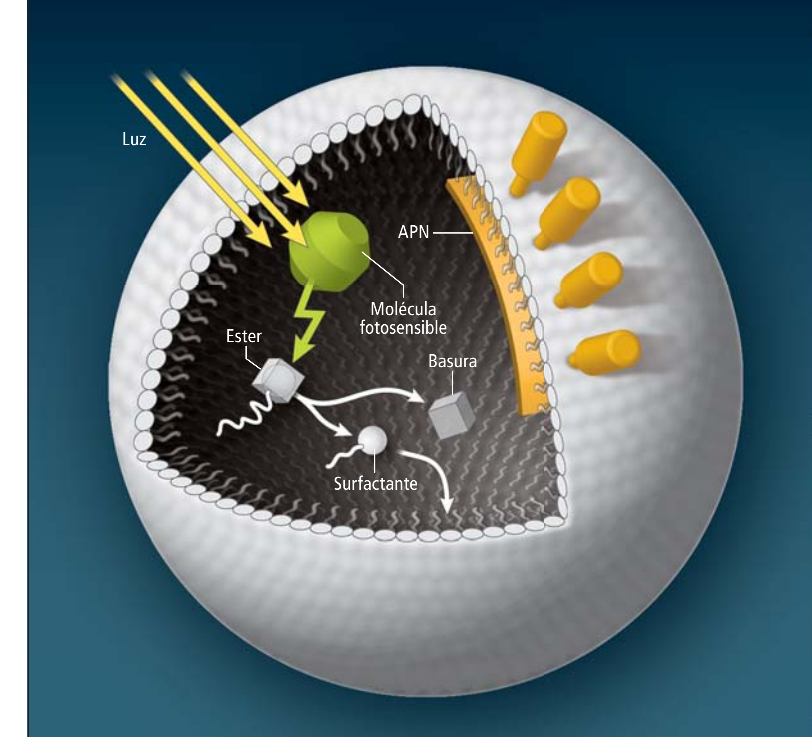
El grupo de Peter M. Glazer, de la Universidad de Yale, ha demostrado en células animales que cuando el APN forma una invasión tríplex con el ADN se activa la reparación de un gen portador de una mutación responsable de la talasemia (una enfermedad de la sangre en humanos). Podría aplicarse el mismo proceso al tratamiento de enfermedades provocadas por la mutación de una base o por la ausencia de pequeños fragmentos de un gen.

El grupo encabezado por David R. Corey, del Hospital Clínico Suroccidental de la Universidad de Texas en Dallas, ha demostrado en células de cáncer de mama humano que el APN bloquea la transcripción. ¿Cómo? Mediante la unión a un segmento de ADN que se separa en dos hebras justo antes de que la enzima ARN-polimerasa comience a transcribir en ARN el ADN. Este proceso aportará nuevos conocimientos sobre la función de determinados genes en la conversión de células sanas en malignas.

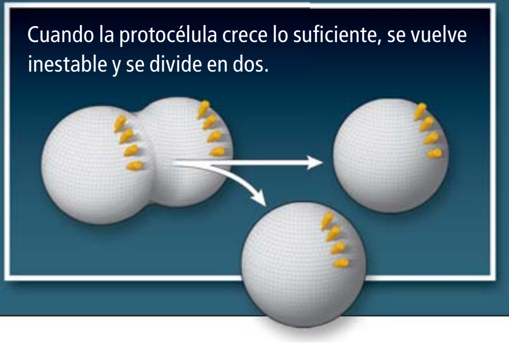
Se han fabricado APN que bloquean la expresión de genes esenciales en bacterias. Inhiben así su crecimiento e incluso les provocan la muerte. Este hallazgo puede conducir a nuevas clases de antibióticos que resuelvan el problema de la resistencia bacteriana a fármacos ya existentes.

VIDA ARTIFICIAL

Los expertos consagrados a la creación de nuevas formas de vida a partir de combinaciones de moléculas inertes contemplan, en el APN, el componente genético (portador de información) de sus diseños. Más sencillo y más estable que el ADN o el ARN, el APN se aloja en la superficie de un contenedor que se autoensambla a partir de moléculas surfactantes. Moléculas de la célula fotosensibles aportan la energía necesaria para generar más moléculas surfactantes a partir de ésteres precursores. Si el APN se replica (*parte superior*), la protocélula en expansión puede dividirse y originar dos copias semejantes (*parte inferior*). Mediante la autoorganización, el metabolismo (aprovechamiento de una fuente de energía) y la autorreplicación, la protocélula muestra algunas de las características distintivas de la vida.




El APN se replica cuando se le engarzan fragmentos cortos de APN complementarios y migra al interior lipídico de la protocélula, donde los fragmentos se unen para formar una segunda hebra de APN.


Cuando la protocélula crece lo suficiente, se vuelve inestable y se divide en dos.

TOMMY MOORMAN

en una célula artificial a modo de almacén de información y a modo de maquinaria catalítica; igual, pues, que lo hacen en una célula viva el ADN y multitud de enzimas de naturaleza proteica. Esta naturaleza dual, junto con las otras propiedades del APN, ha despertado el interés de quienes se dedican a la creación de vida artificial.

Sin embargo, en muchos aspectos el ARN saca ventaja al APN en este juego. Abundan los ejemplos, naturales y sintéticos, de ARN catalítico. Las moléculas de APN catalítico, en cambio, aún están por descubrir. Sin embargo, dado que, al igual que las proteínas y el ARN, los oligómeros de APN se pliegan para generar las formas (estructuras secundaria y terciaria) que resultan fundamentales para realizar la catálisis, estoy convencido de que el desarrollo de una variante catalítica del APN será sólo cuestión de tiempo. Las estrategias más avanzadas para la creación de vida a partir del ensamblaje de conjuntos de moléculas tratan de identificar moléculas de ARN autorreplicantes que catalicen su propia síntesis. En principio, en estos esquemas se sustituirían las moléculas de ARN por APN o por una molécula sintética semejante. Se han descubierto péptidos cortos autorreplicantes y sistemas de replicación autocatalítica que utilizan oligonucléotidos cortos. Debería ser posible, por tanto, desarrollar sistemas análogos de APN autorreplicante. Un sistema autorreplicante basado en el APN ofrecería la ventaja de poseer enlaces peptídicos robustos (desde el punto de vista químico), junto con la versatilidad y la especificidad del reconocimiento de secuencias de bases.

Sin embargo, un sistema de replicación génica es sólo uno de los componentes de la vida, aunque fundamental. La esencia de la vida consiste en un entramado de reacciones químicas que tienen lugar en un estado relativamente estable pero no en equilibrio y que se encuentra abierto a posibles entradas y salidas [*véase* "El origen de la vida", por Robert Shapiro; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2007]. Constituirá, pues, un desafío que se incorpore la molécula autorreplicante en un sistema más amplio que desempeñe otras actividades catalíticas y que posea un ciclo metabólico; lo será también integrar el sistema en el interior de

un compartimento físico, una vesícula lipídica, por ejemplo, para formar lo que los expertos denominan "protocélula".

Steen Rasmussen, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y Liaohai Chen, del Laboratorio Nacional de Argonne, han sugerido un diseño de protocélula primitiva basado en el APN. El contenedor de la protocélula se autoensambla a partir de moléculas de surfactante (cadenas lipídicas con cabezas hidrofílicas, solubles en agua). El esqueleto del APN se modifica para que se convierta en lipofílico (soluble en disolventes orgánicos), de modo que el APN se integre por sus propios medios en la superficie de la protocélula. Fragmentos cortos de APN se emparejan con el APN de la protocélula para constituir una segunda hebra con la secuencia complementaria. Una molécula fotosensible impulsa la producción de más moléculas de surfactante, con el aumento consiguiente del tamaño de la protocélula. Cuando adquiere magnitud suficiente, la protocélula se vuelve inestable y se escinde de manera natural. Con todo, se trata de un modelo muy especulativo, anclado en un problema que los químicos no han resuelto todavía: la estabilidad de la molécula de APN de doble hebra impide en buena medida su separación para dar lugar a dos hebras hijas. Queda un largo y tortuoso camino por recorrer antes de la obtención de células artificiales robustas.

Origen de la vida

Uno de los objetivos más importantes de los trabajos encaminados a crear en el laboratorio vida *de novo* consiste en comprender mejor los orígenes de la vida en la Tierra. Si tenemos en cuenta la microbiología de las formas de vida actuales, parece que el ARN fue anterior y más importante para la vida que el ADN o las proteínas. Ese tipo de molécula contiene el genotipo (información contenida en la secuencia genética) y el fenotipo (funciones catalíticas) de un organismo. Por ello, y por pruebas de otro tipo, muchos científicos aceptan hoy en día la idea de que nuestro mundo basado en ADN/ARN/proteína vino precedido de un mundo constituido por ARN [*véase* "Origen de la vida sobre la Tierra", por Leslie E. Orgel; Investigación y Ciencia, diciembre de 1994].

Sin embargo, no está muy claro el modo en que se habrían generado moléculas de ARN en las primitivas condiciones prebióticas, en concreto el monosacárido ribosa que forma parte del esqueleto del ARN. Es más, incluso si llegaron a producirse moléculas de ARN, la escasa estabilidad química del ARN apenas habría permitido que las moléculas sobreviviesen desprotegidas el tiempo suficiente como para desempeñar una función crucial en los inicios de la evolución química de la vida.

Así, el APN constituye un buen candidato a molécula que habría formado parte de un mundo anterior al ARN: es extremadamente estable y sencillo desde el punto de vista químico y porta información en su secuencia.

En 2000, Stanley L. Miller, famoso por su experimento pionero que demostró, hace más de 50 años, la formación de aminoácidos en condiciones que imitaban a las de la Tierra primitiva, identificó precursores del APN en experimentos similares. Se ha demostrado también que la información de la secuencia de un oligómero de APN puede transferirse, mediante "copiado químico", a otro oligómero de APN o a una molécula de ARN, procesos necesarios para un mundo de APN así como para un posterior mundo transitorio basado en APN/ARN.

Construir, a partir de esas escasas observaciones, un mundo anterior al ARN basado en el APN o en alguna molécula semejante, es un salto aventurado. Para que la hipótesis se sostenga, habría que hallar moléculas de APN con actividad catalítica.

Quince años después de su descubrimiento, queda mucho por aprender sobre el APN. ¿Podemos construir moléculas de APN catalíticas? ¿Qué sistema permitiría introducir en las células APN terapéuticos? ¿Resulta factible crear en el laboratorio una forma de vida totalmente distinta, basada en APN? Confío en que estas y otras cuestiones hallarán respuesta de aquí a 15 años.



¿UN MUNDO DE APN?

Algunos investigadores han sugerido que las primeras formas de vida sobre la Tierra podrían haberse basado en el APN (o en una molécula semejante portadora de información) porque es más simple y más estable que el ARN, una molécula que, para muchos, surgió antes que el ADN. Ese "mundo de APN" habría evolucionado para dar lugar a un "mundo de ARN" en el que la vida se basaba en ARN; de ahí se habría pasado al mundo que conocemos hoy, basado en ADN, ARN y proteínas.

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

Bibliografía complementaria

SEQUENCE-SELECTIVE RECOGNITION OF DNA BY STRAND DISPLACEMENT WITH A THYMINE-SUBSTITUTED POLYAMIDE. Peter E. Nielsen, Michael Egholm, Rolf H. Berg y Ole Buchardt en *Science*, vol. 254, págs. 1497–1500; 6 de diciembre, 1991.

TEMPLATE SWITCHING BETWEEN PNA AND RNA OLIGONUCLEOTIDES. Christof Böhler, Peter E. Nielsen y Leslie E. Orgel en *Nature*, vol. 376, págs. 578–581; 17 de agosto, 1995.

PEPTIDE NUCLEIC ACID. A MOLECULE WITH TWO IDENTITIES. Peter E. Nielsen en *Accounts of Chemical Research*, vol. 32, n.º 7, págs. 624–630; julio, 1999.

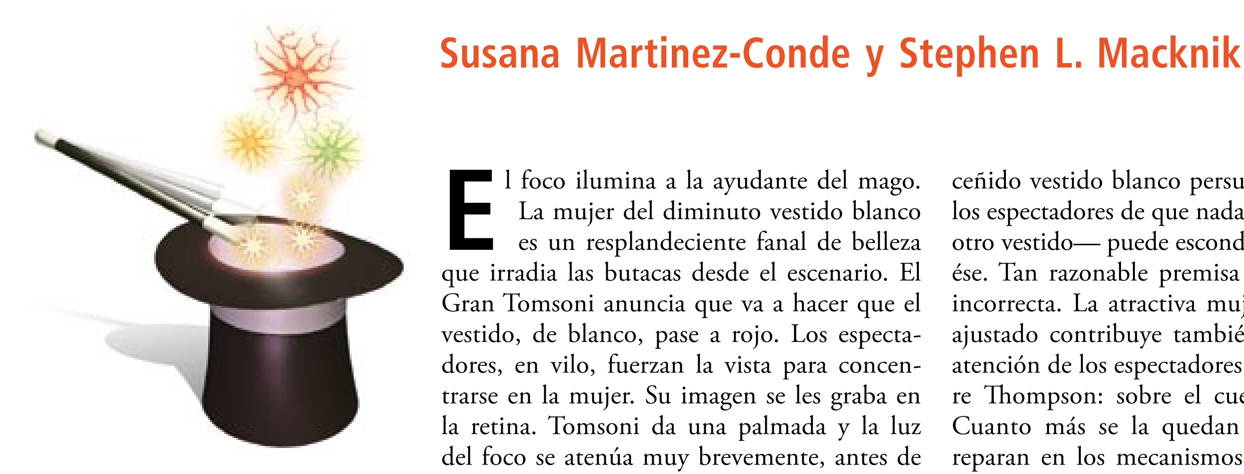
SYNTHESIZING LIFE. Jack W. Szostak, David P. Bartel y P. Luigi Luisi en *Nature*, vol. 409, págs. 387–390; 18 de enero, 2001.

PREBIOTIC CHEMISTRY AND THE ORIGIN OF THE RNA WORLD. Leslie E. Orgel en *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, vol. 39, págs. 99–123; marzo-abril, 2004.

Magia y cerebro

Los magos han estado explotando y poniendo a prueba los límites de la cognición y la atención durante siglos. Los neurocientíficos están empezando a darles alcance

Susana Martinez-Conde y Stephen L. Macknik



CONCEPTOS BASICOS

- Los trucos de magia funcionan a menudo gracias a la diversión encubierta, que desvía la atención del espectador del “método” secreto que hace que funcione el truco.
- Los neurocientíficos se han puesto a analizar los trucos de magia para aprender en qué medida podrían aplicarlos en estudios experimentales centrados en diversos aspectos de la consciencia, no siempre basados en la realidad sensorial.
- Técnicas de imagen cerebral muestran que algunas regiones se encuentran particularmente activas durante ciertos tipos de trucos de magia.

El foco ilumina a la ayudante del mago. La mujer del diminuto vestido blanco es un resplandeciente fanal de belleza que irradia las butacas desde el escenario. El Gran Tomsoni anuncia que va a hacer que el vestido, de blanco, pase a rojo. Los espectadores, en vilo, fuerzan la vista para concentrarse en la mujer. Su imagen se les graba en la retina. Tomsoni da una palmada y la luz del foco se atenúa muy brevemente, antes de volver a fulgurar con un resplandor encarnado: la mujer está ahora bañada por un torrente de luz roja.

Que el color del vestido cambie bajo la luz de un reflector no es precisamente el prodigio que el público se esperaba. El mago se sitúa a un lado del escenario, parece que satisfecho con su broma ingenua. Sí, lo admite, es un truco barato; los que más me gustan, explica con una sonrisa de diablillo. Pero no pueden negar que el vestido ahora está rojo, como la mujer que lo viste. Por favor, denle el gusto de dirigir su atención una vez más a la bella ayudante mientras él vuelve a cambiar las luces para el próximo truco. Al sonido de su palmada, las luces se atenúan de nuevo, y de pronto el escenario estalla en una supernova de blancura. ¡Pero ahora el vestido realmente se ha vuelto rojo! ¡El Gran Tomsoni ha triunfado de nuevo!

El truco, y su explicación, dada por el propio John Thompson (el Gran Tomsoni), revelan un profundo conocimiento intuitivo de los procesos neurales que tienen lugar en el cerebro del espectador, un conocimiento que los neurocientíficos podemos aprovechar en beneficio propio. El truco es el siguiente: cuando Tomsoni presenta a su ayudante, su ceñido vestido blanco persuade sin palabras a los espectadores de que nada —ciertamente no otro vestido— puede esconderse por debajo de ése. Tan razonable premisa es, por supuesto, incorrecta. La atractiva mujer con su vestido ajustado contribuye también a concentrar la atención de los espectadores justo donde quiere Thompson: sobre el cuerpo de la mujer. Cuanto más se la quedan mirando, menos reparan en los mecanismos escondidos en el suelo y mejor llegan a adaptarse las neuronas de su retina al brillo de la luz y al color que perciben.

Durante todo el parloteo de Thompson tras su broma, el sistema visual de los espectadores estuvo experimentando un proceso cerebral de adaptación neural. El grado de reacción de un sistema neural a un estímulo constante (medido a través de la tasa de descarga de las neuronas pertinentes) decrece con el tiempo. Es como si las neuronas ignorasen de forma activa un estímulo constante y ahorrasen sus fuerzas para el momento en que tengan que señalar que un estímulo está cambiando. Cuando el estímulo constante se apaga, las neuronas adaptadas disparan una respuesta de tipo “rebote”, una “posdescarga”.

En este caso, el estímulo de adaptación es el vestido iluminado con luz roja: Thomson sabe que las neuronas retinianas de los espectadores dispararán su rebote durante una fracción de segundo tras atenuarse las luces. El público seguirá viendo una posimagen de color rojo, con la forma de la mujer. Durante esa fracción de segundo se abre una trampilla en el escenario, y el vestido blanco, apenas sujeto con velcro y conectado a cables invisibles que llegan hasta debajo del escenario, es arrancado

JEAN-FRANCOIS PODEVIN (*chistera y varita mágica*); MISHA GRAVENOR (*Penn & Teller*)



LOS MAGOS PENN & TELLER ejecutan una versión actualizada del clásico truco de "cortar a una mujer por la mitad", de eficacia asegurada (Penn maneja la sierra; Teller es la víctima demasiado conforme con su suerte). Los neurocientíficos están adaptando los métodos de la magia a varias clases de experimentos; entre ellos, el estudio de la respuesta cerebral ante percepciones que parecen desafiar toda experiencia real previa.

¿ENGAÑANDO A LA MENTE O AL OJO?

Esta imagen, basada en el cuadro *Enigma*, del artista francés Isia Léviant, suele inducir la falsa sensación de un flujo de movimiento en los anillos concéntricos (fije la mirada en el punto central de la imagen). Pero esa ilusión, ¿se origina en la mente o en el ojo? Las pruebas discrepaban hasta que los autores y sus colegas mostraron que el movimiento ilusorio se debe a micromovimientos sacádicos: pequeños e involuntarios movimientos de los ojos que ocurren durante la fijación visual. Conocer los papeles de ojo y mente en la magia es esencial, antes de servirse de las ilusiones de la magia como herramientas experimentales de la neurociencia.



CORTESIA DE JORGE OTERO-MILLAN *Laboratorio de Neurociencia Visual*

ILUSIONES COGNITIVAS

Los neurocientíficos están estudiando de qué modo los magos explotan los lapsus mentales, entre ellos:

- **CEGUERA AL CAMBIO**
  Un observador no advierte cambios producidos en una escena durante una breve interrupción.

  EJEMPLO: El color del mobiliario cambia entre escenas de una obra de teatro.

- **CEGUERA INATENCIONAL**
  Un espectador no percibe objetos que se encuentran completamente a la vista.

  EJEMPLO: Una persona disfrazada de gorila se introduce en una escena y pasa inadvertida.

- **CEGUERA A LA ELECCION**
  Un espectador explica los motivos de una elección, aunque tal elección no se llevó a cabo.

  EJEMPLO: Un hombre no se da cuenta de que la fotografía que eligió ha sido secretamente reemplazada por otra y explica su "preferencia" por esta última.

- **CORRELACION ILUSORIA**
  Un evento parece causar otro con el que no tiene ninguna relación.

  EJEMPLO: Un mago mueve la varita, y aparece un conejo.

del cuerpo de la mujer. Entonces se vuelven a encender las luces.

Otros dos factores contribuyen a que funcione el truco: el primero, la iluminación es tan intensa justo antes de que se arranque el vestido que, cuando se amortigua, los espectadores no pueden ver los rápidos movimientos de los cables, ni el vestido blanco mientras desaparece bajo el escenario. Es como la ceguera transitoria que puede sobrevenirle a uno cuando entra en la penumbra de una tienda viniendo de una calle soleada. El segundo: Thomson ejecuta el verdadero truco sólo una vez que el público cree que ya ha terminado. Esto le proporciona una importante ventaja cognitiva: los espectadores no están examinando el truco en el momento crítico, con lo que relajan su escrutinio.

La nueva ciencia de la neuromagia

El truco de Thompson constituye una buena ilustración de la esencia de un espectáculo de magia. Los magos son, ante todo, artistas de la atención y de la aprehensión. Manipulan el foco y la intensidad de la atención humana controlando en cada instante aquello de lo que somos conscientes y aquello de lo que no. En parte lo logran gracias a asombrosas combinaciones de ilusiones visuales (las posimágenes, por ejemplo), ilusiones ópticas (el humo, los espejos), efectos especiales (explosiones, disparos de fogueo, juegos de luz con un preciso control temporal), compartimentos secretos, artefactos mecánicos y prestidigitación.

Pero el instrumento más versátil en el maletín del mago puede que sea la habilidad de crear ilusiones cognitivas. Al igual que las ilusiones visuales, las ilusiones cognitivas enmascaran la percepción de la realidad física. Pero al contrario que aquéllas, no son de naturaleza sensorial, sino que implican funciones de alto nivel: la atención, la memoria y la inferencia causal. Con todas estas herramientas a su disposición, el mago bien entrenado hace que resulte casi imposible seguir las leyes físicas de lo que está sucediendo en realidad. Se tiene así la impresión de que no hay otra explicación que la magia.

Los neurocientíficos están empezando a igualar la facilidad que el mago tiene de manipular la atención y la cognición. Pero sus objetivos son otros. Quieren conocer las bases cerebrales y neuronales de las funciones cognitivas, mientras que el mago desea principalmente explotar las debilidades cognitivas. No obstante, las técnicas desarrolladas por los magos a través de siglos de espectáculos de magia podrían ser, en manos de los neurocientíficos, sondas que complementen, y quizás expandan, los instrumentos que ya utilizan en sus experimentos.

La neurociencia se está familiarizando con los métodos de la magia y somete a la propia magia a estudio científico. Ha descubierto incluso cómo funcionan en el cerebro algunos de los métodos de los magos. Muchos de esos estudios de la magia confirman lo que la psicología experimental nos había enseñado acerca de la cognición y la atención. Un cínico podría desestimar tales esfuerzos: ¿para qué llevar a cabo otro estudio más, que sólo confirma lo que es bien sabido? Pero semejante crítica no tiene en cuenta la importancia y propósito de las investigaciones. Al abordar las técnicas de la magia, los neurocientíficos se familiarizan con métodos que pueden adaptar a sus propósitos. Creemos incluso que la neurociencia cognitiva podría haber avanzado más rápidamente si los investigadores se hubieran interesado antes por las intuiciones de los magos. Los magos podrían incluso disponer de trucos que los neurocientíficos no han adoptado todavía.

Mediante la aplicación de las técnicas de la magia, los neurocientíficos pueden tener la esperanza de aprender a diseñar experimentos más sólidos y crear ilusiones visuales y cognitivas más efectivas para la exploración de las bases neurales de la atención y la consciencia. Dichas técnicas no sólo posibilitarían estudios experimentales de la cognición con sujetos inteligentes y muy atentos, también podrían conducir al diagnóstico y a métodos de tratamiento de pacientes que sufren déficits cognitivos específicos (por ejemplo, déficits de la atención provocados por traumas cerebrales, el síndrome de hiperactividad con déficit de la atención o la enfermedad de Alzheimer). Los métodos de la magia podrían además emplearse para "engañar" a pacientes con la intención de que se concentren en las partes más importantes de su terapia y, al propio

tiempo, suprimir distracciones causantes de confusión y desorientación.

Con la palabra "diversión" nos referimos a la práctica del mago de distraer la atención del espectador ante una acción secreta. En la magia, la diversión dirige la atención del público hacia el "efecto" y la aleja del "método", el secreto tras el efecto. Tomando prestados algunos términos de la psicología cognitiva, hemos clasificado la diversión como "expresa" y "encubierta". La diversión es expresa si el mago redirige la mirada del espectador alejándola del método, quizá simplemente pidiendo a los espectadores que observen un objeto determinado. Cuando el Gran Tomsoni presenta a su bella ayudante sabe que ella será el centro de todas las miradas.

La diversión "encubierta", en contraste, es una técnica más sutil; también aquí el mago aleja el foco de atención del espectador —o su foco de sospecha— del método, pero sin tener que redirigir la mirada del espectador. Bajo la influencia de la diversión encubierta, los espectadores pueden observar el mecanismo subyacente al truco y, aun así, no ser conscientes del mismo.

La neurociencia cognitiva reconoce, por lo menos, dos clases de diversión encubierta. En la "ceguera al cambio" no nos percatamos de que, en una escena, hay algo que difiere de la situación precedente. El cambio puede ser esperado o inesperado; la característica clave estriba en los observadores, que no lo notan cuando miran la escena en un instante dado. El observador tiene que comparar el estado poscambio con el estado precambio.

Muchos estudios han mostrado que los cambios no tienen por qué ser sutiles para que haya ceguera al cambio. Incluso drásticas alteraciones de una escena visual pasarán inadvertidas si tienen lugar durante una breve interrupción: un parpadeo, un movimiento ocular sacádico (en el que el ojo salta rápidamente de un punto a otro) o un destello de luz. El vídeo del "truco de la carta que cambia de color", del psicólogo y mago Richard Wiseman, de la Universidad de Hertfordshire, constituye un ejemplo muy llamativo de este fenómeno (el vídeo se encuentra en www.youtube.com/watch?v=voAntzB7EwE). En el número de Wiseman —hay que verlo para apreciarlo—, los observadores no reparan en cambios de color que tienen lugar fuera del encuadre de las cámaras. Merece la pena señalar que, a pesar de su nombre, el vídeo del truco de la carta que cambia de color no utiliza magia para mostrar lo que quiere mostrar.

La ceguera "inatencional" difiere de la ceguera al cambio en que no hay necesidad de comparar la escena actual con una escena memorizada: al observador le pasa inadvertido un objeto inesperado, perfectamente visible. El psicólogo Daniel J. Simons concibió un ejemplo clásico. Simons y el psicólogo Christopher F. Chabris, ambos por entonces en la Universidad de Harvard, pidieron a unos observadores que contasen cuántas veces los tres jugadores de un "equipo" de baloncesto se pasaban la pelota uno al otro, ignorando al mismo tiempo los pases llevados a cabo por otros tres jugadores. Mientras se concentraban

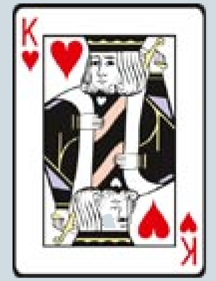
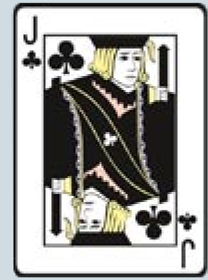
Los autores

Susana Martinez-Conde y **Stephen L. Macknik** trabajan en el Instituto Neurológico Barrow, de Phoenix, donde Martinez-Conde es directora del Laboratorio de Neurociencia Visual, y Macknik, director del Laboratorio de Neurofisiología del Comportamiento. Su artículo "Las ventanas de la mente" se publicó en octubre de 2007 en *Investigación y Ciencia*.

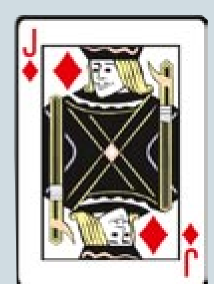
Los autores agradecen a sus colaboradores del mundo de la magia que hayan compartido con ellos muchas de sus intuiciones: Mac King, James Randi (el Asombroso Randi), Apollo Robbins, Teller (del dúo Penn & Teller) y John Thompson (el Gran Tomsoni). También dan las gracias a la Asociación para el Estudio Científico de la Consciencia y a la Fundación Ciencia de la Mente.

¿PUEDE EVITAR QUE LE LEAMOS LA MENTE?

¿Puede el lector explicar los asombrosos resultados del siguiente experimento de lectura de la mente de Clifford Pickover, prolífico autor de libros de divulgación de ciencia y matemáticas? El lector puede probar con esta simulación del test de Pickover, o puede hacerlo en su ordenador con la versión de http://sprott.physics.wisc.edu/pickover/esp.html. Utilizando el sistema de Percepción Extrasensorial de Pickover, creemos poder predecir el correcto resultado de su elección con una exactitud del 98 %. Para comenzar, elíjase una de las seis cartas presentadas a continuación y memorícese.





Dígase el nombre de la carta en voz alta varias veces, para no olvidarlo. Una vez el lector esté seguro de recordarla, dibújese un círculo alrededor de uno de los ojos de la hilera inferior. A continuación diríjase a la última página del artículo.



COMO HACER QUE APAREZCAN MONEDAS DE LA NADA

El mago Teller utiliza la prestidigitación y técnicas de distracción del foco de atención para crear la ilusión de "el sueño del avaro". Esconde secretamente seis monedas en la palma de cada mano. Hace que aparezcan en cualquier lugar a su alcance —entre su propio cabello, entre la ropa de los espectadores, en el espacio vacío— y las deja caer en un cubo de latón con un ruido muy audible. El engaño



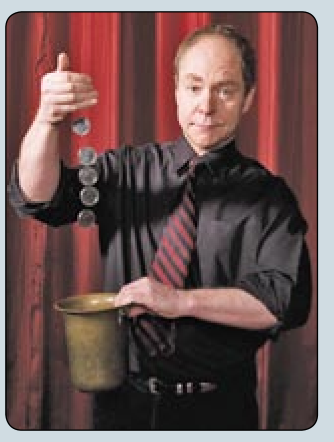
Muestra que el cubo está vacío y comienza a hacer aparecer monedas en su mano derecha.



Al dirigir la mirada hacia su mano derecha, distrae la atención del público de su mano izquierda. Pero es la mano izquierda, la misma que sostiene el cubo, la que está dejando caer las monedas escondidas.



En realidad, está haciendo aparecer la misma moneda repetidamente en su mano derecha.



Justo cuando el público comienza a sospechar que Teller está simplemente dejando caer monedas escondidas en su mano derecha, deja caer cinco de las seis monedas de su mano derecha, todas a la vez. El público se queda atónito, ya que no podría haber escondido 11 monedas en su mano derecha.

MISHA GRAVENOR (*Teller*)

en contar pases, la mitad de los observadores no advirtieron que una persona disfrazada de gorila cruzaba la escena (¡el gorila incluso se detenía brevemente en el centro de la pantalla y se golpeaba el pecho!). Para crear este efecto no se requirieron interrupciones bruscas o distracciones; la tarea de contar resultó tan absorbente, que muchos observadores no se percataron del gorila, pese a tenerlo delante de los ojos.

¿Se engaña al ojo o al cerebro?

Los magos consideran que una maniobra de diversión encubierta es más elegante que otra expresa. Pero los neurocientíficos desean averiguar qué tipos de mecanismos neurales y cerebrales permiten que un truco funcione. Para que las artes mágicas le valgan a la neurociencia, hay que entender los procesos cognitivos de que se sirven.

Quizás el primer estudio que correlacionó la percepción en la magia con una medida fisiológica fue el publicado en 2005 por Gustav Kuhn, de la Universidad de Durham, y Benjamin W. Tatler, de la Universidad de Dundee. Midieron los movimientos de los ojos de unos observadores mientras Kuhn, que es asimismo mago, hacía "desaparecer" un cigarrillo dejándolo caer bajo la mesa. Quería determinar, entre otras cosas, si a los observadores se les escapaba el truco porque no miraban al lugar adecuado en el momento debido o porque no le prestaban atención, sin importar la dirección en que estuviesen mirando. Los resultados fueron claros: daba igual adónde mirasen.

Un estudio similar de otro truco de magia, la "ilusión de la bola que desaparece", proporciona pruebas adicionales de que el mago manipula la atención a un alto nivel cognitivo; la dirección de la mirada de los espectadores no resulta esencial para el efecto. En la ilusión de la bola que desaparece, el mago lanza una bola hacia arriba y la atrapa en su descenso varias veces, sin incidentes. En el lanzamiento final, en cambio, sólo finge que arroja la bola. Su cabeza y ojos siguen la trayectoria ascendente de una bola imaginaria, pero en vez de lanzar la bola real, la esconde secretamente en la palma de su mano. La mayoría de los espectadores percibe, sin embargo, que la bola (no lanzada en realidad) asciende, para a continuación evaporarse en el aire.

Al año de su estudio con Tatler, Kuhn y el neurobiólogo Michael F. Land, de la Universidad de Sussex, descubrieron que la mirada de los espectadores no apuntaba hacia el punto donde ellos mismos decían que habían visto desaparecer la bola. El descubrimiento sugiere que la ilusión no engañó a los mecanismos cerebrales responsables de los movimientos de los ojos. Kuhn y Land extrajeron la conclusión de que los movimientos de la cabeza y los ojos del mago fueron fundamentales para crear la ilusión, porque, de manera encubierta, redirigieron el foco de la atención de los espectadores (en vez de su mirada) a

depende en parte de factores sociales como la posición de la cabeza del mago y la dirección de su mirada.



Teller hace aparecer la última moneda escondida en su mano derecha, y a continuación vuelve la mano para mostrar que su palma está, de hecho, vacía.



De forma espectacular, Teller lanza al aire las 11 monedas del cubo mientras sigue sosteniendo la moneda final en su mano derecha.

la posición predicha de la bola. Las neuronas que respondieron al movimiento de la bola sugerido por los movimientos de la cabeza y los ojos del mago se encuentran en las mismas áreas visuales del cerebro que las neuronas sensibles al movimiento real. Si el movimiento implicado y el real activan similares circuitos neurales, quizá no deba sorprendernos que la ilusión parezca tan realista.

Kuhn y Land sostienen la hipótesis de que la bola que desaparece podría ser un ejemplo de "impulso en la representación". La posición final de un objeto en movimiento que desaparece se percibe más avanzada a lo largo de su trayectoria que la posición final auténtica, como si la posición predicha se extrapolase a partir del movimiento inmediatamente anterior.

Más trucos convertidos en herramientas

Los espectadores a menudo tratan de reconstruir los trucos de magia para entender lo que ocurrió durante el espectáculo; pero cuanto más intenta el espectador entender el truco y menos lo logra, más "mágico" parece ser. Por su parte, los magos suelen retar al público a descubrir sus métodos, y les "demuestran" que un sombrero está vacío o que el vestido de su ayudante es demasiado ajustado para que esconda un segundo vestido por debajo. Pero casi todo cuanto hacen, lo hacen para dificultar la reconstrucción del truco en la medida de lo posible, y para ello se valen de la diversión.

La ceguera al cambio y la ceguera inatencional no son las únicas clases de ilusiones cognitivas que los magos pueden sacar de su sombrero. Suponga que un mago necesita levantar una mano para ejecutar un truco. Teller, del renombrado dúo mágico Penn & Teller, explica que si levanta la mano sin motivo aparente, es más probable que atraiga sospechas que si hace un gesto con la mano —ajustarse las gafas o rascarse la cabeza— que parezca natural o espontáneo. Los magos dicen de tales gestos que "informan el movimiento".

Las suposiciones que no llegan a expresarse verbalmente y la información implícita son también importantes para la percepción de un truco y para su reconstrucción. En opinión del mago James Randi, resulta más fácil que los espectadores lleguen a aceptar sugerencias e informaciones no verbalizadas que aserciones directas. De ahí que, en la reconstrucción, el espectador pueda recordar sugerencias implícitas como si se tratara de una prueba directa.

Petter Johansson y Lars Hall, de la Universidad de Lund, y sus colaboradores han aplicado esta y otras técnicas de la magia para desarrollar una forma novedosa de abordar cuestiones neurocientíficas.

Presentaron pares de fotografías de rostros femeninos a sujetos experimentales que desco-

ILUSIONES VISUALES EN LA MAGIA

No toda magia es cognitiva. Explotar propiedades bien conocidas del sistema visual puede también dar lugar a efectos insólitos, entre ellos:

- **DOBLAR CUCHARAS**
  Un mago hace oscilar una cuchara, de forma que su mango parece flexible.

  POR QUE FUNCIONA: Las neuronas de la corteza visual sensibles tanto al movimiento como a las terminaciones de las líneas responden de manera diferente a las oscilaciones que otras neuronas visuales. El resultado es una aparente discrepancia entre las terminaciones de un estímulo y su centro; un objeto sólido parece doblarse en el medio.

- **DESAPARICION MIENTRAS PERSISTE LA VISION**
  El mago retira un objeto del campo visual, pero éste permanece visible durante un tiempo breve.

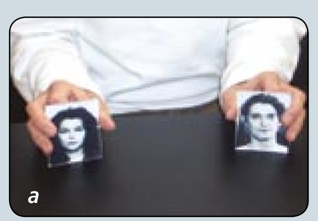
  POR QUE FUNCIONA: La posdescarga neural produce posimágenes durante unos 100 milisegundos después de que un estímulo haya cesado.

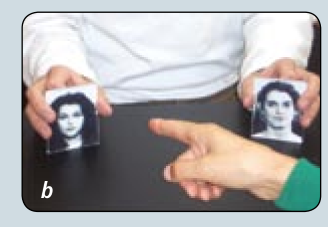
- **LA DISTORSION ESPACIAL TRIZONAL DE JERRY ANDRUS**
  Los espectadores miran fijamente un disco giratorio con tres zonas de movimiento en expansión y contracción. Cuando observan un objeto estacionario a continuación, éste parece expandirse y contraerse.

  POR QUE FUNCIONA: Las neuronas se adaptan de manera diferente a los movimientos en las tres zonas del campo visual.

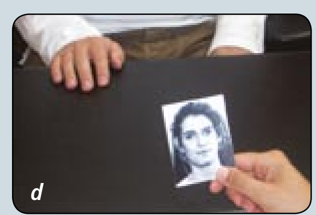
INDUCCION DE FALSAS EXPLICACIONES

En un experimento se mostraron a los sujetos pares de fotografías (*a*) y se les pidió que escogiesen la imagen más atractiva (*b*). Tras cada elección, los investigadores volvieron las fotografías boca abajo (*c*) y utilizaron prestidigitación para reemplazar algunas de las imágenes escogidas con las desechadas. A continuación, se volvió de nuevo boca arriba a la fotografía "elegida", y se pidió a los probandos que explicasen su preferencia. Incluso cuando la imagen mostrada era en realidad la rechazada (*d*), muchos sujetos construyeron una "explicación" de la elección. El impulso de las personas de ajustar las que erróneamente creen que son sus propias elecciones a una explicación coherente puede, por tanto, suplantar a menudo el recuerdo de su selección real.









nocían el objetivo del experimento. Les pidieron que escogiesen el rostro de cada par que les pareciese más atractivo. En ciertos ensayos también se pidió a los sujetos que describiesen las razones de su elección. Sin el conocimiento de los sujetos, los investigadores utilizaron una técnica de prestidigitación aprendida de un mago profesional, Peter Rosengren, para reemplazar una cara por la otra *después* de que los sujetos realizasen su elección. Así, en los pares secretamente manipulados, la elección del sujeto se convertía en la opuesta de su intención inicial.

Curiosamente, los sujetos sólo se dieron cuenta del cambio en un 26 por ciento de los pares manipulados. Pero incluso fue aún más sorprendente que, cuando se les pedía que declarasen las razones de su elección en una de esas pruebas manipuladas, se las ingeniaban para justificar el resultado, ¡un resultado opuesto a su verdadera elección! Johansson y su equipo denominaron "ceguera a la elección" al fenómeno producido. Al sugerir a los sujetos de forma tácita pero convincente que ya habían elegido, los investigadores estudiaron de qué modo las personas justifican las elecciones realizadas, incluso elecciones que no son realmente suyas.

El carterista en el cerebro

Las técnicas de diversión podrían también basarse en las habilidades del carterista. Estos ladrones, que a menudo ejercen su oficio en densos espacios públicos, dependen en buena medida de técnicas de diversión de tipo social: el contacto con la mirada, el contacto corporal y la invasión del espacio personal de la víctima. Los carteristas pueden asimismo mover sus manos de distintas maneras, dependiendo de su propósito real. Pueden trazar una trayectoria curva, si desean atraer la atención de la víctima hacia el recorrido completo del movimiento, o pueden trazar una veloz trayectoria recta, si desean reducir la atención que se presta al recorrido y desviarla rápidamente hacia la posición final.

Desconocemos los fundamentos neurocientíficos de las maniobras descritas, pero Apollo Robbins, un "carterista" profesional que colabora en nuestras investigaciones, ha subrayado que los dos tipos de movimientos son esenciales para dirigir a otra parte la atención de la víctima. Hemos propuesto varias explicaciones que pueden ponerse a prueba.

Según una de ellas, los movimientos curvos y rectilíneos de la mano activan en el cerebro dos sistemas, diferentes, de control del movimiento de los ojos. El sistema de "seguimiento" controla los ojos cuando siguen a objetos que se mueven suavemente; el sistema "sacádico", los movimientos en los que los ojos han de saltar de un objetivo visual a otro. Apoyados en ello hemos formulado una hipótesis: los movimientos curvos de la mano del carterista pueden activar el sistema de control ocular de seguimiento de la víctima, mientras que los movimientos rápidos y rectilíneos hacen lo mismo con el sistema sacádico.

Por consiguiente, si el sistema de seguimiento de la víctima sigue la trayectoria curvada de la mano del carterista, el centro de la visión de la víctima se alejará del punto donde se produce el hurto. Y si los movimientos rápidos y rectilíneos se apoderan del sistema sacádico de la víctima, el carterista tendrá la ventaja de que la visión de la víctima quedará suprimida mientras el ojo se dispara de punto a punto. (El fenómeno se conoce bien en las ciencias de la visión, donde recibe el nombre de supresión sacádica.)

Otra posible explicación de los diferentes movimientos de la mano es que los movimientos curvos pueden resultarle a la percepción más sobresalientes que los lineales y, por tanto, atraer mayor atención. En tal caso, sólo el sistema de atención del cerebro —no los sistemas de control de los movimientos del ojo— podría encontrarse afectado por el movimiento manual de distracción que efectúa el carterista. Nuestros estudios han mostrado que las curvas y esquinas de los objetos destacan más y generan mayor actividad cerebral que

DIVERSION MULTISENSORIAL

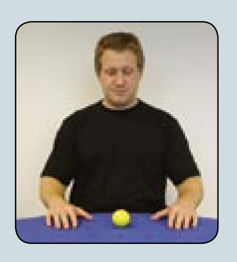
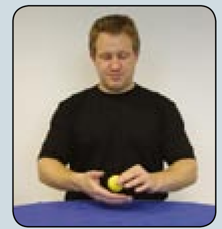
Apollo Robbins (*abajo a la derecha*), que se anuncia a sí mismo como "ladrón profesional", demuestra que hacer que la víctima mire en una cierta dirección impide que preste atención a sus objetos de valor. Se vale de la manipulación del tacto y del espacio personal de la víctima, así como del cambio de foco de atención de la vista. Un impresionante vídeo de Robbins sustrayendo subrepticiamente el reloj de pulsera de otro hombre se encuentra disponible en http://tinyurl.com/6lhxy8

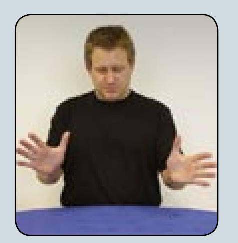
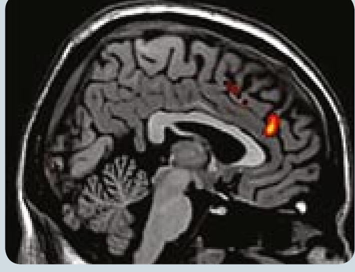


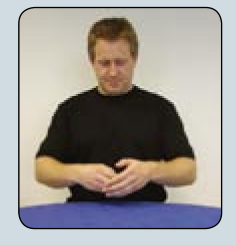
CORTESIA DE APOLLO ROBBINS

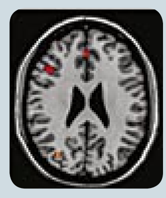
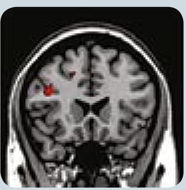
ASI ABORDA EL CEREBRO LO "IMPOSIBLE"

Los sujetos experimentales vieron vídeos de trucos de magia que parecían exhibir relaciones causales imposibles, como hacer que una bola desapareciese (*hilera superior de fotografías*), al tiempo que se tomaban imágenes de resonancia magnética funcional de su cerebro. Un grupo de control observó vídeos muy similares, aunque sin incluir trucos de magia (*hilera inferior*). Las áreas del cerebro realzadas en color muestran dónde existió actividad neural adicional cuando los sujetos observaron los vídeos de magia en vez de los vídeos de control.

los bordes rectos. La razón es, probablemente, que las curvas y esquinas afiladas son menos predecibles y redundantes (y, por tanto, más novedosas e informativas) que los bordes rectos. De la misma manera, las trayectorias curvas pueden ser menos redundantes y, por tanto, más sobresalientes, que las rectilíneas.

Magia mientras se examina el cerebro

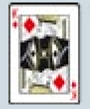
No parecen tener fin las posibilidades que la magia ofrece a la identificación de los circuitos neurales responsables de funciones cognitivas específicas. Se ha tomado prestada una técnica de la magia para que unos voluntarios conectasen incorrectamente dos eventos como causa y efecto; mientras, se registraban imágenes de su cerebro. Cuando el evento A precede al evento B, a menudo concluimos, correcta o incorrectamente, que A causa B. El mago hábil aprovecha tal predisposición, asegurándose de que el evento A (digamos, verter agua sobre una pelota) preceda siempre al evento B (la desaparición de la pelota). A no causa B, pero su aparición previa ayuda al mago a hacer que así lo parezca. Los psicólogos cognitivos llaman correlación ilusoria a este tipo de efecto.

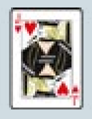
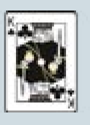
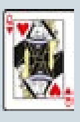
En un estudio aún no publicado que se realizó en 2006, Kuhn y los neurocientíficos cognitivos Ben A. Parris y Tim L. Hodgson, de la Universidad de Exeter, mostraron a los probandos unos vídeos de trucos de magia que contenían violaciones aparentes de la relación de causa y efecto; mientras, registraban imágenes de sus cerebros con resonancia magnética funcional. Las imágenes cerebrales de los probandos se compararon con las de un grupo de control: personas que observaron vídeos que no contenían aparentes violaciones causales. Se observó una mayor activación en la corteza cingulada anterior entre los sujetos que estaban observando trucos de magia que entre los controles. El descubrimiento sugiere que esta área cerebral puede ser importante para la interpretación de relaciones causales.

Este trabajo de Kuhn y sus colegas sólo deja entrever la medida en que se podría manipular con las técnicas de la magia la atención de los individuos y su capacidad de tomar conciencia de lo que está sucediendo, y mientras investigar la fisiología de sus cerebros.

Leímos su mente

¡Hemos retirado su carta!



¿Adivinamos la carta que eligió en el recuadro "¿Puede evitar que le leamos la mente?" En caso positivo, ¿explica el sistema de Percepción Extrasensorial de Pickover nuestra respuesta correcta, o existe una explicación más sencilla? No siga leyendo si no quiere saber todavía la respuesta.

¿Se rinde? Observe una vez más las seis cartas del recuadro y compárelas con las cinco cartas ilustradas aquí. ¿Nota alguna diferencia? Si la acción de rodear uno de los ojos con un círculo lo distrajo y cayó en la trampa (como le pasa a la mayoría), usted es una víctima de lo que los psicólogos denominan ceguera al cambio. Un cambio —incluso un cambio grande y obvio— puede resultar casi invisible.

Bibliografía complementaria

FAILURE TO DETECT MISMATCHES BETWEEN INTENTION AND OUTCOME IN A SIMPLE DECISION TASK. Petter Johansson, Lars Hall, Sverker Sikström y Andreas Olsson en *Science*, vol. 310, págs. 116–119; 7 de octubre, 2005.

THERE'S MORE TO MAGIC THAN MEETS THE EYE. Gustav Kuhn y Michael F. Land en *Current Biology*, vol. 16, n.º 22, págs. R950–R951; 21 de noviembre, 2006.

ATTENTION AND AWARENESS IN STAGE MAGIC: TURNING TRICKS INTO RESEARCH. Stephen L. Macknik, Mac King, James Randi, Apollo Robbins, Teller, John Thompson y Susana Martinez-Conde en *Nature Reviews Neuroscience*. Avance de publicación en la Red: 30 de julio, 2008.

En www.mindscience.org/magicsymposium pueden verse las actuaciones de grandes magos en el Simposio Magia de la Consciencia de 2007.

Pingüino de Magallanes

Jesús Noriega, Montse García y Josep-Maria Gili

Los pingüinos patagónicos (*Spheniscus magellanicus*) llegan a las playas de la Patagonia desde las costas de Brasil o Uruguay tras realizar un viaje de más de 3000 kilómetros. Se dirigen a las aguas subantárticas para reproducirse.

Excavan nidos en el suelo, en forma de hoyo, que conservan durante toda su vida. A inicios de septiembre llegan los machos, que preparan el nido; las hembras llegan unas semanas más tarde. Los nidos resultan esenciales para proteger a los polluelos de los numerosos depredadores: skúas, petreles gigantes y gaviotas.

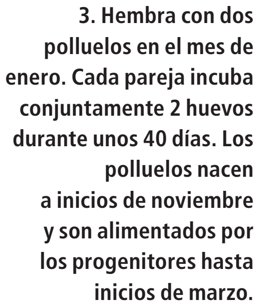
Presentan un manto muy tupido de plumas, que lubrican continuamente con un aceite que segregan mediante la glándula uropigia. En su conjunto, la cobertura de plumas es casi impermeable; ello hace que, cuando se sumergen, la mayor parte del cuerpo no entre en contacto con el agua. Sólo el pico y las patas pierden calor. Se trata de animales robustos. Su dieta es muy variada, aunque prefieren pulpos, calamares y peces (sardina y pejerrey); consumen también gran cantidad de krill y otros crustáceos.



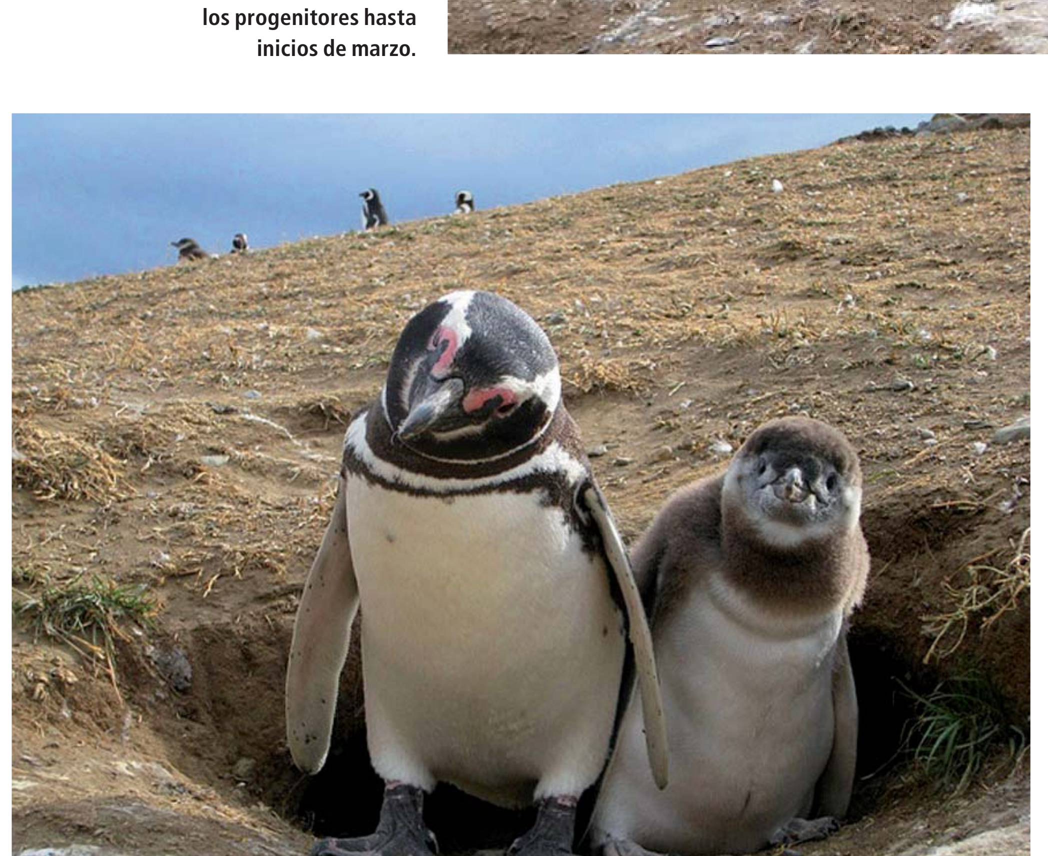
1. Colonia de pingüinos de Magallanes (*Spheniscus magellanicus*) en la isla Magdalena, a unos 35 kilómetros al sur de Punta Arenas (Chile). Aquí viven unas 62.000 parejas.



2. Ejemplar adulto. Los machos, de mayor tamaño y con picos más largos que las hembras, llegan a pesar 5 kilogramos; alcanzan la madurez sexual a los 4 o 5 años.



3. Hembra con dos polluelos en el mes de enero. Cada pareja incuba conjuntamente 2 huevos durante unos 40 días. Los polluelos nacen a inicios de noviembre y son alimentados por los progenitores hasta inicios de marzo.



JESUS NORIEGA, MONTSE GARCIA Y JOSEP-MARIA GILI (*fotografías*)

4. Los polluelos nacen con un plumaje gris, que pierden en la primera muda, en febrero. Seguirán con un plumaje juvenil hasta el año siguiente.

John Pawelek: Teoría de una fusión letal

La capacidad de extenderse define al cáncer letal. Las células tumorales se propagan, piensa John Pawelek, cuando se funden con los macrófagos. Una teoría que —de ser cierta— podría dar lugar a nuevas terapias

Charles Q. Choi

Mañana de sábado fría y gris de febrero de 1993, en la Universidad de Yale. John Pawelek lee, entero, el número de la revista oncológica donde aparece un artículo escrito por su laboratorio. Esa atención desacostumbrada iba a cambiar el curso de sus investigaciones, encaminándolas hacia una controvertida explicación del aspecto más mortífero del cáncer: su capacidad de extenderse por el organismo.

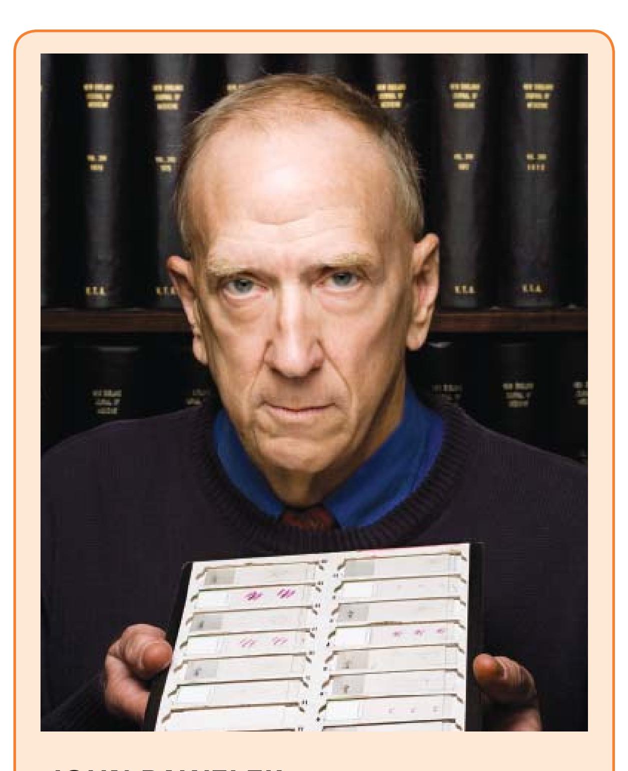
El número contenía una carta de tres médicos checos que se preguntaban si no podría ser la fusión de células tumorales con glóbulos blancos de la sangre lo que causara la metástasis. Por aquel entonces, Pawelek estaba leyendo también un libro de Lynn Margulis, creadora de la hipótesis de la fusión celular en la evolución de los eucariotas. "Me quedé muy impresionado por la conexión. Puesto que en la evolución había un precedente de hibridación, ¿por qué no iba a poder ocurrir también en el cáncer?"

Durante los últimos 15 años, Pawelek y sus colegas han demostrado que las células cancerosas pueden fundirse con leucocitos y volverse extremadamente metastásicas en animales de laboratorio. Ahora quieren ver si el mismo proceso se da en humanos. Las metástasis son la causa principal de la letalidad del cáncer (los tumores, en general, se pueden tratar en tanto que no interesen órganos vitales). Si la investigación acaba demostrando que tales híbridos contribuyen a la extensión del cáncer por el organismo, se abrirían nuevas vías para luchar contra esa enfermedad. Como afirma Pawelek: "Hay que saber cómo empieza la metástasis para triunfar en la lucha".

Pero la ignorancia que tenemos sobre la causa de que el cáncer se extienda es exasperante. Para explicar las capacidades que poseen las células metastásicas (desprenderse de sus tumores originales, dejar atrás otras células, recorrer el cuerpo por vasos sanguíneos o linfáticos, invadir otros tejidos y proliferar), primero hay que entender cómo interactúan las células entre sí. "Y todavía no tenemos útiles biológicos adecuados para investigar las interacciones entre diferentes tipos de células y de órganos", explica Bert Vogelstein, de la Universidad Johns Hopkins.

Una de las teorías acerca del origen de las metástasis afirma que las células tumorales adquieren la capacidad de migrar a causa de mutaciones en uno o varios genes. Otra propone que no son necesarias mutaciones específicas; sino que las células cancerosas acumularían, por una u otra razón, un número anormal de cromosomas, lo que daría al traste con los mecanismos que en las células normales evitan las metástasis. En opinión de Pawelek, estas teorías no explican cómo adquieren las células cancerosas los cambios genéticos —y además en el orden correcto— que se necesitan para que la propagación tenga éxito.

Pawelek piensa que las células cancerosas se propagan tras fusionarse con un tipo de leucocitos, los macrófagos. Al igual que las células metastásicas, los macrófagos pueden deambular e infiltrarse en casi cualquier parte del cuerpo; son por naturaleza resistentes a los fármacos tóxicos. "La metástasis es una fase muy diferente del cáncer ordinario, como si fuera una nueva enfermedad amén de la ya existente. Quizá hereden las células cancerosas todos esos rasgos de golpe al hibridarse con los glóbulos blancos", conjetura. Por demás, los macrófagos regularmente engullen gérmenes y células mórbidas; podrían, pues, fundirse ocasionalmente con células tumorales en vez de destruirlas, del mismo modo que las células primitivas se



ETHAN HILL

JOHN PAWELEK

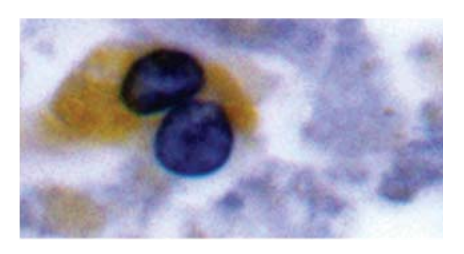
EL PODER DE LA FUSION: Propone que los tumores comienzan a propagarse y formar metástasis tras fusionarse con leucocitos.

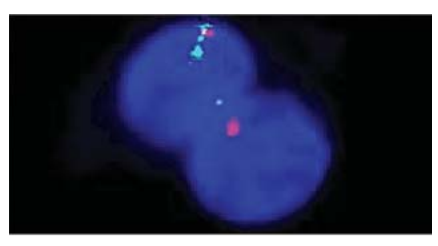
PROPAGACION LETAL: Para el cáncer de mama, la tasa de supervivencia a los cinco años es del 98 por ciento, antes de que haya propagación, y del 26,7 por ciento si la hay; para el cáncer de próstata, 100 por ciento antes, 31,9 por ciento después.

unieron entre sí en relaciones simbióticas hace mil millones de años, razona Pawelek.

En sus primeros experimentos, su equipo tomó una cepa de células de melanoma de un ratón que sólo eran débilmente metastásicas, y las fusionaron con macrófagos de ratón exponiéndolas al polietilenglicol, que disuelve las membranas celulares. Implantaron estas células híbridas en unos 5000 ratones. "Fueron experimentos a gran escala", cuenta Pawelek, "que nos llevaron cuatro años y realizamos casi a ciegas", narra Pawelek.

Los resultados fueron insólitos: aproximadamente el 55 por ciento de las células híbridas terminaron "verdaderamente malignas, muy metastásicas", en contraste con las células de melanoma fundidas entre sí, ninguna de las cuales se volvió metastásica. "Estaba convencido de que íbamos por el buen camino".





¿MARIDAJE METASTASICO? Una mujer que recibió un trasplante de célula ósea de su hijo desarrolló células cancerosas en el riñón (*de color azul en la fotografía óptica de la izquierda*). Una imagen por fluorescencia de esas células (*a la derecha*) pone de manifiesto cromosomas Y (*en rojo*), lo que hace pensar que el carcinoma procedía de una hibridación de sus células con las células de la médula ósea de su hijo.

DE "FUSION OF TUMOUR CELLS WITH BONE MARROW-DERIVED CELLS: A UNIFYING EXPLANATION FOR METASTASIS", POR JOHN M. PAWELEK Y ASHOK K. CHAKRABORTY EN *NATURE REVIEWS CANCER*, VOL. 8, MAYO DE 2008

Pawelek y sus colaboradores han encontrado también semejanzas moleculares entre células metastásicas y macrófagos, como la activación de genes relacionados con el movimiento. Además, descubrieron que estas células cancerosas producen al parecer unos orgánulos, los autofagosomas, con los que las células digieren algunas partes de sí mismas. Los macrófagos producen con frecuencia autofagosomas; es una manera de alimentarse de sí mismos mientras viajan. Puede que las células cancerosas hagan lo mismo.

Pawelek no es el primero al que cautiva la teoría de la fusión. Su primer valedor fue Otto Aichel, en 1911. Revivió de nuevo unos 50 años después, gracias a unos experimentos en los que se demostraba que las células tumorales implantadas podían fusionarse de manera espontánea con otras células en animales de laboratorio y propagarse. A mediados de la década de los ochenta, decayó el interés. David Goldenberg, que llevó a cabo algunos de esos estudios y ahora es presidente del Centro Oncológico Garden State en Belleville, opina que la idea dejó de resultar atractiva porque, a pesar de que se veían híbridos de células foráneas y del hospedador, con los medios de aquel entonces no se podía mostrar que esas fusiones aconteciearan realmente en un medio natural. Después de todo, si las fusiones ocurrieran en pacientes de cáncer, tanto las células tumorales como los macrófagos serían idénticas genéticamente, lo cual dificultaría la demostración de que las células metastásicas son híbridos.

Pero Pawelek cree que la técnica ha avanzado lo suficiente y que la prueba de su tesis podría encontrar en pacientes de cáncer que han recibido trasplantes de médula ósea. La radioterapia y la quimioterapia acaban con la médula ósea, que suministra glóbulos blancos al cuerpo. Como la médula ósea del donante es, por naturaleza, genéticamente distinta del paciente, se podría observar si las células tumorales del receptor se fusionaron con los macrófagos del donante.

Hasta el momento, el grupo de Pawelek ha encontrado dos posibles casos. En uno de ellos, un chico con grupo sanguíneo 0 recibió un trasplante de médula ósea de su hermano, cuya sangre era de tipo A. Cuando el receptor de la médula desarrolló más tarde cáncer de riñón, se encontraron células tumorales que tenían grupo sanguíneo A. En otro caso, una mujer que recibió un trasplante de médula ósea de su hijo desarrolló después cáncer de riñón; el nuevo tumor contenía células con el cromosoma Y masculino. En estos dos casos humanos, sin embargo, no se ha podido confirmar que las células contuviesen el genoma del receptor. Por tanto, queda en pie la posibilidad de que no fueran híbridos, sino que, simplemente, procediesen del donante. En muestras futuras, Pawelek espera utilizar técnicas forenses de análisis de ADN que detecten genes del receptor y del donante en las mismas células.

Cualquier búsqueda de híbridos es muy propensa a los errores, advierte el experto en células madre Irving Weissman, de la Universidad de Stanford: "Lo he visto en infinidad de ocasiones; se cree que es un híbrido, pero casi siempre se trata de una célula que tiene otra adherida o muy cercana". (Pawelek insiste en que se puso un gran cuidado de no cometer esos errores.)

Weissman cita también otros estudios que muestran lo contrario, que los híbridos resultantes de la fusión de células tumorales con células normales son en realidad menos cancerosos, al parecer porque la infusión de ADN sano ayuda a suprimir la actividad maligna. Pawelek sugiere que el tipo de célula usado puede explicar en parte dicha discrepancia: las fusiones con leucocitos muestran un aumento de malignidad, mientras que otros tipos de células, las epiteliales por ejemplo, suprimen los tumores.

Pero incluso aunque Pawelek demostrase que las células fusionadas se convierten en metastásicas, dice Vogelstein, todavía habría que ver si esos híbridos abarcarían una fracción significativa de las metástasis o si hay otros mecanismos que desencadenen la mayoría de los cánceres que se extienden.

Si Pawelek tiene razón, se dispondrá de nuevos métodos para combatir el cáncer. Cabría elaborar medicinas a partir de anticuerpos que ataquen células fusionadas que tengan características químicas peculiares, o desarrollar terapias que bloqueen las moléculas relacionadas con la fusión celular. "Aun cuando anduviere errado —señala Vogelstein—, hay que tener en cuenta que dejarse guiar por ideas poco trilladas con frecuencia lleva a nuevos hallazgos".

Mientras tanto, el trabajo de Pawelek ha inspirado a otros laboratorios: 75 científicos acudieron al primer congreso sobre fusión celular y cáncer, celebrado en Suecia en octubre de 2007, donde él fue uno de los ponentes. Al parecer, la teoría de la fusión se está extendiendo.

Apagones y quiebras en cadena

Los mecanismos de realimentación de la red económica pueden transformar las crisis locales en mundiales

Jeffrey D. Sachs

La crisis económica mundial se asemeja a un apagón. Una simple caída de cables de alta tensión o una fugaz sobrecarga hace que la energía eléctrica se dirija a otra parte de la red, lo que a su vez crea nuevas sobrecargas, nuevas redistribuciones de la energía y, finalmente, una sucesión de fallos que sumen en la oscuridad a toda una región. Del mismo modo, una situación de emergencia de la banca norteamericana, que se originó por el empeoramiento de las condiciones del mercado nacional, ha enviado ondas de choque a través del sistema financiero internacional, causando una crisis bancaria global que ahora amenaza con un grave deterioro de la economía mundial.

Los fallos en cadena son fenómenos emergentes de una red, más que fallos independientes pero coincidentes de las partes que la componen. Aunque muchos bancos de EE.UU. y Europa, simultáneamente y por su cuenta, invirtieron en exceso en valores respaldados por hipotecas, la realimentación positiva del sistema económico global amplificó estos errores. Todavía no se ha concedido a estas realimentaciones la importancia que merecen.

La primera realimentación clave es la "espiral de la deflación de la deuda". Cuando la tasa de morosidad en el pago de hipotecas empezó a subir en 2007, los bancos sufrieron pérdidas de capital por su posesión de valores respaldados por hipotecas. Para devolver el dinero a los acreedores (por ejemplo, a los fondos de inversión que les habían prestado el dinero a corto plazo), los bancos vendieron sus valores respaldados por hipotecas masivamente, con lo que bajaron aún más sus precios de mercado y las pérdidas del sector bancario aumentaron todavía más.

La segunda realimentación consiste en que, cuando los bancos sufren pérdidas de capital por malos activos, recortan el préstamo en un múltiplo de esas pérdidas de capital. Ese recorte hace bajar aún más los precios de la vivienda y de otros bienes, con una subsiguiente reducción del valor de los activos de los bancos y agravamiento de su deterioro.

Una tercera realimentación: cuando quiebran uno o más bancos, cunde el pánico. Los bancos toman prestados activos a corto plazo para invertir en activos a largo plazo que se pueden liquidar rápidamente sólo a costa de grandes pérdidas. Cuando los acreedores a corto plazo de un banco comienzan a sospechar que *otros* acreedores a corto plazo están retirando sus préstamos, cada acreedor intenta, racionalmente, retira sus propios créditos antes que los demás. El resultado es una estampida hacia las puertas de salida que se alimenta a sí misma, como la que provocó en todo el mundo la quiebra de Lehman Brothers, el pasado septiembre. Este tipo de "pánicos racionales" puede arruinar bancos solventes.

Cuarta realimentación: cuando los bancos recortan sus préstamos, se desploman el consumo privado y las inversiones en negocios, se dispara el desempleo y los bancos sufren aún más pérdidas de capital al aumentar los morosos. La economía cae en picado. Sólo enérgicas políticas fiscales y monetarias de China, Japón, Alemania y otras naciones con superávit internacional pueden impedir este fenómeno en la situación actual. La recesión de EE.UU. resulta ya inevitable, pero todavía se pueden moderar sus efectos, así como obviarlos en gran medida en el este asiático, siempre que se tomen acciones correctoras.

La posibilidad de estas realimentaciones amplificadoras se conoce desde la Gran Depresión; se han venido adoptando algunas medidas parciales de protección. Entre las principales, el establecimiento de normas de adecuación del capital que protejan a cada banco de las pérdidas de capital, los préstamos de emergencia del banco central ("el prestamista de última instancia"), la garantía de depósitos y las políticas macroeconómicas anticíclicas. En la práctica estas políticas se han aplicado caprichosamente, sin considerar las consecuencias en países vecinos; en general han resultado insuficientes y tardías. Tampoco ha habido mucha preocupación por crear "cortafuegos" para evitar que los impactos se propaguen rápidamente entre países.

Ya que los responsables políticos empiezan ahora a reformar los sistemas financieros y económicos mundiales, sería sensato que consultaran el análisis clásico de la Gran Depresión en *A Monetary History of the United States*, 1867-1960, de Milton Friedman y Anna Jacobson Schwartz. Según los autores, "el desplome económico muestra a menudo un carácter de proceso acumulativo. Si se deja que pase de cierto punto, tenderá a ganar fuerza durante un tiempo a partir de su propio desarrollo a medida que sus efectos se extienden y retornan para intensificar el desplome. Que no se requiera mucha fuerza para sujetar la roca que origina un alud no significa que el alud no pueda ser de proporciones enormes".

El peligro va mucho más allá de las finanzas. El riesgo desorbitado que corríamos con la reciente burbuja financiera se queda pequeño ante los riesgos a largo plazo a que nos hallamos expuestos corriendo por no tratar las crisis interconectadas del agua, la energía, la pobreza, la comida y el cambio climático. La crisis financiera debería abrirnos los ojos a estas amenazas sistémicas de magnitud mucho mayor.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

El chocolate

El oro negro de la gastronomía viene consumiéndose de forma habitual entre la población occidental desde hace menos de un siglo

Pere Castells

A los productos exclusivos se les ha atribuido en numerosas ocasiones un origen divino. En la antigua Grecia creían que los diamantes eran fragmentos de estrellas caídos del cielo; los llamaban "lágrimas de los dioses". En Mesoamérica, los aztecas adoraban al dios del cacao, Quetzalcoatl. Ya en el siglo XVIII, Carl von Linné dio al árbol del cacao el nombre de *Theobroma cacao*, derivado de los términos griegos *theos* ("dios") y *broma* ("alimento"): "el alimento de los dioses".

El chocolate procede del Xocoatl, una bebida de cacao con especias. Desempeñaba una función crucial en las ceremonias reales y religiosas mayas; la consumían todas las clases sociales. Los mayas suministraron cacao a los aztecas que vivían en la meseta de México, donde el clima era demasiado frío y seco para cultivarlo. Con él elaboraban una bebida de la que disfrutaba sólo la élite: gobernantes, sacerdotes, guerreros y mercaderes.

Los europeos tuvieron conocimiento del Xocoatl cuando, en 1519, llegó a México Hernán Cortés. Poco a poco, desde España, la bebida se fue introduciendo en la aristocracia europea. Ingleses, holandeses y franceses establecieron plantaciones de cacao en sus colonias tropicales; pronto importaron cacao a Europa. La revolución industrial trajo consigo una serie de innovaciones técnicas en el procesado de las semillas del cacao, que resultaron en la obtención de un producto sólido de consumo. En 1828, Van Houten patentó un método para prensar la pasta de cacao, que separaba una parte de la grasa en forma de manteca de cacao. El proceso de obtención del chocolate se completó cuando, en 1879, Rudolph Lindt mejoró el sabor y la textura del producto sólido mediante la técnica del conchado.

La base del chocolate es el cacao, que se cultiva sólo en zonas ecuatoriales de clima tropical. Existen tres variedades del árbol del cacao: criollo (el original, hoy en día el más escaso), forastero (muy resistente y, por tanto, el más cultivado) y trinitario, híbrido de los anteriores.

El primer paso en la producción del chocolate corresponde a la extracción de las semillas o granos de cacao. Se procede luego a la fermentación de los granos, de los que se elimina la pulpa para reducir el sabor amargo y potenciar el aroma. Le sigue la etapa de secado, que reduce la humedad sobrante. A continuación, la torrefacción de los granos produce, mediante las reacciones de Maillard, parte de los sabores que tendrá el chocolate. A partir de las semillas del cacao se obtiene granilla ("nibs"), pasta de cacao ("nibs" procesados, transformados en pasta) y los dos componentes de la pasta de cacao, la manteca de cacao (grasa) y el cacao en polvo (extracto seco).

El chocolate se elabora con pasta de cacao, manteca de cacao y otros ingredientes, entre los que destacan azucares (sobre todo sacarosa), lecitina y, en algunos casos, leche, especias o aromatizantes. Se somete el preparado al proceso de conchado: unas palas mezclan la masa de forma lenta y continua. Se consigue así, por un lado, la disminución de la concentración de compuestos volátiles que darían al chocolate un fuerte sabor ácido y astringente, y, por otro, recubrir con grasa la superficie de las partículas, lo que facilita su desaglomeración; la lecitina facilita en grado sumo este proceso, pues reduce la viscosidad de la masa.

La producción del chocolate entraña otra etapa compleja: el templado. Imprescindible también en todas las elaboraciones posteriores como los bombones, este proceso se basa en controlar la cristalización de las grasas de la manteca de cacao. Estas grasas pueden cristalizar en seis formas, pero sólo una de ellas —que no es la más estable— conduce a un producto con un brillo y características organolépticas adecuadas. El templado garantiza que las grasas adopten la forma cristalina adecuada. Para lograr una cristalización óptima, se funde el chocolate a 45 ºC, se enfría luego a 28 ºC y se vuelve a calentar a 31 ºC (los márgenes variarán según el tipo de chocolate.

Si el chocolate no está bien templado, pasado un breve espacio de tiempo la superficie aparece moteada y mate; la textura es arenosa y el aroma y el sabor poco intensos. Ello se debe al problema de la eflorescencia de las grasas ("fat bloom"): en un chocolate mal templado, las diversas formas cristalinas de las grasas evolucionan rápidamente hacia la forma más estable; se produce entonces la migración hacia la superficie de parte de las grasas del cacao, lo que confiere al chocolate una apariencia blanquecina. Si las condiciones de conservación no son óptimas, aunque el chocolate esté templado, con el tiempo las grasas acaban adoptando la forma cristalina estable; la consiguiente migración de grasas hacia la superficie modifica la textura y el sabor. Para frenar la eflorescencia, el chocolate debe conservarse a temperaturas de entre 15 y 17 ºC.

A buen seguro, el siglo XXI nos deparará nuevas texturas para el chocolate: emulsiones especiales, liofilizaciones, esferificaciones, etcétera. Como la versión que presentaron a principios de 2006 Yu Wen Chen y Malcolm Robert Mackley, del departamento de ingeniería química de la Universidad de Cambridge: un chocolate elástico y moldeable, obtenido mediante extrusión en frío. Aunque esa elasticidad desaparece en períodos de tiempo cortos, la adaptación de este proceso facilitará el desarrollo de las ya creativas técnicas que emplean los profesionales del chocolate actuales.

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

SEGURIDAD DINAMICA para automóviles

Las técnicas de seguridad en automoción podrían ofrecernos vehículos que redujesen mucho la posibilidad de sufrir un accidente e incluso que no necesitaran conductor

Steven Ashley

CONCEPTOS BASICOS

- Cada día, los sistemas de seguridad inteligentes arrebatan a los conductores una parte mayor del control del vehículo con el fin de evitar colisiones o, por lo menos, reducir lesiones y la pérdida de vidas. Dentro de pocos años, los coches evitarán los accidentes sin intervención de los conductores.
- La aparición de los llamados coches antichoque responde a las expectativas de los usuarios en materia de seguridad, a las presiones gubernamentales, a la congestión de la red viaria, al envejecimiento y consiguiente pérdida de facultades de la población, y al uso de vehículos más ligeros, de estructura menos resistente a las colisiones.
- Entre tanto, se han hecho ya demostraciones de vehículos robotizados. Este desarrollo, junto con los coches antichoque, hace pensar que el vehículo sin conductor no puede estar muy lejos.

Ante mí, la autopista recta y desierta, hasta el horizonte. Aprovecho para mirar la pantalla del salpicadero. Leo deprisa los números que aparecen en ella. Pero cuando vuelvo a mirar a la carretera, ya no veo nada; una densa niebla la ha invadido, conduzco a ciegas. Antes de que se me ocurra apretar el pedal del freno, destella en el parabrisas una señal de alarma inconfundible: el rectángulo rojo de una luz de frenada. Piso a fondo el freno, y se me escapa un exabrupto. Mi vehículo se para en seco; delante, un coche estropeado ha aparecido de pronto entre la niebla.

A mi alrededor se encienden luces y suenan risas extemporáneas. Recuerdo entonces que estoy en la cabina del simulador de prueba de conducción virtual (VIRTTEX, por sus siglas en inglés) del Centro de Investigación e Innovación de Ford en Dearborn, Michigan. Este gran simulador ovoide permite experimentar la conducción en condiciones de realidad virtual absolutamente seguras, aunque muy verosímiles. Las carcajadas que escuchaba provenían de los técnicos del control ante mi momentáneo desconcierto.

Durante el cuarto de hora anterior me habían sometido a varias pruebas, todas encaminadas a demostrar los peligros de conducir sin la debida atención. La última había sido mirar la pantalla del salpicadero y leer en alto los números que iban apareciendo sin perder el control del vehículo. Apartar los ojos de la carretera más de dos segundos duplica el riesgo de sufrir una colisión, o al menos de estar a punto de sufrir una.

Mike Blommer, responsable del laboratorio VIRTTEX, me explicó en la charla posterior a las pruebas que la alarma presentada en el parabrisas durante el último ejercicio era un aviso visual generado por la unidad de alarma de colisiones frontales que llevan los automóviles Volvo. El sistema actúa como un ángel de la guarda electrónico, que vigila el tráfico frontal y advierte al conductor cuando detecta peligro. No es casual la gran semejanza del aviso con una luz de frenada normal; se ha elegido así porque su significado es intuitivo para cualquier conductor.

Este es sólo un ejemplo de la última generación de dispositivos concebidos para proteger de los accidentes de tráfico. Numerosos modelos de gama alta los incorporan. Comienzan ya a implantarse en coches más económicos y también en camiones. Y el siguiente hito de la técnica de la prevención de choques debería ser aún más eficaz: el accionamiento automático de los frenos sin que el conductor intervenga en absoluto. Tales medidas de seguridad y otras conexas pueden anunciar una nueva era para el automóvil, en la que los propietarios de coches acepten mejor la asistencia automatizada durante la marcha, aunque ello implique ceder a los sistemas robotizados en parte la tradicional sensación de dominio sobre el vehículo. Dentro de algunas

KENN BROWN *Mondolithic Studios*



1. UNA BURBUJA VIRTUAL DE SEGURIDAD creada en torno de los coches futuros por sensores inteligentes será una eficaz barrera contra los accidentes.

REDUCCION DEL NUMERO DE VICTIMAS

El uso creciente de técnicas de seguridad en la automoción quizá se esté dejando ya sentir.

En Estados Unidos, según el informe "Traffic Safety Facts 2006" de la NHTSA:

- Los choques con resultado de muerte descendieron el 1,7 por ciento de 2005 a 2006.
- El número de heridos por cada cien millones de kilómetros recorridos bajó un 5,6 por ciento de 2005 a 2006.
- La tasa de mortalidad de ocupantes de vehículos (incluidas las motocicletas) por cada 100.000 personas se redujo en un 4,3 por ciento de 1992 a 2006.
- La tasa de lesiones de ocupantes de vehículos (motocicletas incluidas) por cada 100.000 personas cayó un 27,8 por ciento de 1992 a 2006.
- La tasa de mortalidad entre peatones y ciclistas por cada 100.000 personas descendió en un 51,9 por ciento desde 1975 a 2006.

En España, según la Dirección General de Tráfico (en http://www.dgt.es/portal/es/seguridad_vial/estadistica):

- En 1980 hubo 67 accidentes con víctimas y 5 muertos por cada 10.000 vehículos; en 1993, 45 y 4; en 2007, 33 y 1.
- Por cada mil accidentes, hubo 74 muertos y 1588 heridos en 1980; 80 y 1466 en 2003 (año a partir del cual el número de muertos se establece a los 30 días del accidente); 49 y 1456 en 2005; 41 y 1437 en 2006; y 38 y 1418 en 2007.
- En 1980 hubo 1,33 muertos por cada 10.000 habitantes; en 1993, 1,63; en 2007, 0,86.
- De 2008 se cuenta ya con el dato provisional de que el número de muertos por accidentes en carretera, contando sólo los fallecidos en las primeras 24 horas, fue un 20% inferior al de 2007.

En la Unión Europea de 27 miembros:

- 1.270.000 accidentes con 42.952 muertos en 2007, 0,87 por cada 10.000 habitantes.

décadas, según los expertos, habrá muchos coches avanzados, preparados para esquivar la mayoría de las colisiones. En algún momento, conducirán por sí mismos.

En pos de la seguridad

Las innovaciones reseñadas responden a motivaciones claras. Según datos de la Administración Nacional de Autopistas y Seguridad en el Tráfico (NHTSA), en 2006 se produjeron unos seis millones de accidentes de tráfico en EE.UU., con el resultado de 39.000 muertos y 1,7 millones de heridos [Cien mil accidentes con víctimas en España en 2007, con 3823 muertos y unos 146.000 heridos; la población de España es alrededor de la séptima parte de la de Estados Unidos.] Casi el 95 por ciento de los 10,6 millones de vehículos afectados eran coches de turismo o camiones ligeros. Mientras tanto, pese a las incesantes peticiones de mayores inversiones en seguridad del tráfico, las carreteras se congestionan más y más en Norteamérica. En el resto del mundo prevalecen circunstancias análogas, sobre todo en los países de economía emergente donde las compras privadas de coches se han disparado.

Según Jörg Breuer, de Mercedes-Benz, la mayoría de los accidentes se deben a errores de conducción. Al conductor le puede ser difícil evaluar con qué intensidad ha de frenar cuando el vehículo que le precede frena de repente; así pierde unos instantes preciosos en apreciar la magnitud del peligro. Por eso Mercedes y sus competidores se afanan en ofrecer una asistencia automática a la frenada.

Dos tendencias presionan a favor de una mayor automatización de los automóviles. La primera es el veloz crecimiento del promedio de edad de los conductores en el mundo. A medida que la capacidad y las facultades físicas de un conductor disminuyen, la técnica puede compensar esa merma, al tiempo que mantiene la seguridad de los ocupantes del coche y demás usuarios de las vías.

La segunda tendencia es algo menos evidente. Crece la preferencia por los vehículos más ecológicos, que consumen menos energía y respetan el entorno. Gran parte de los trabajos se centran en el desarrollo de motores de mayor rendimiento, pero es posible obtener efectos parecidos construyendo coches más ligeros. Por desgracia, esta "ligereza" suele ir emparejada con estructuras menos resistentes que tienden a sufrir más daños en las colisiones. Inconveniente de algún modo compensado si los automóviles están capacitados para evitar los accidentes.

Por otra parte, ciertos factores retardan la implantación de las técnicas de seguridad avanzadas. Su coste es bastante elevado; a los fabricantes de automoción les preocupan las costosas implicaciones legales que puedan acarrear las lesiones o muertes debidas a fallos de los sistemas de seguridad. Y, por encima de todo, se cuidan de no alterar demasiado la fuerte sensación de control sobre el vehículo propia de un conductor. De ahí que se esfuercen por enseñar a los conductores las ventajas que les ofrecen esos sistemas, a medida que los introducen, e infundirles confianza en ellos.

Salvar la vida

Son ya familiares las técnicas de la primera generación, llamadas de seguridad activa, que ayudan a los conductores a evitar los accidentes o a reducir los daños o lesiones resultantes. (En cambio, las de seguridad pasiva —cinturones de seguridad, bolsas inflables, o *airbags*, y zonas de deformación o aplastamiento— protegen cuando la colisión se ha producido.) Los sistemas de frenos antibloqueo (ABS), introducidos en 1978, permiten controlar mejor la trayectoria del vehículo y desacelerar con más celeridad pisando el freno a fondo. Según Breuer, ABS fue el primer sensor con capacidad de 'percibir' una situación crítica y de actuar automáticamente para remediarla.

El siguiente instrumento importante de la seguridad fueron los sistemas de control de tracción (TCS). Impiden la pérdida de tracción en las ruedas motrices y, por tanto, mejoran el control total del vehículo cuando el conductor pisa demasiado el acelerador (abre la válvula de admisión) y produce un par motor (fuerza de rotación) superior al que puede tolerar el estado del pavimento.

Se logró luego el control de estabilidad electrónico (ESC), sistema basado en la continua supervisión del ángulo que forma el volante con la dirección del vehículo. Esta última viene determinada por sensores que evalúan la velocidad del movimiento transversal, el ángulo del coche con respecto a su eje central y la velocidad de giro de las ruedas. Cuando el sistema ESC detecta derrapes, trata de corregirlos activando de un modo selectivo los frenos necesarios para enderezar la trayectoria. También puede reducir la potencia del motor hasta que el coche rectifique la dirección por sí mismo.

Los estudios de Mercedes y Toyota indican que la instalación del ESC ha conseguido reducir entre el 29 y el 35 por ciento los choques de un solo vehículo y de un 15 a un 30 por ciento las colisiones frontales. Según Kay Stepper, de la División de Circulación y Seguridad de Vehículos de Robert Bosch, el notorio éxito del ESC viene subrayado por la reciente decisión de la NHTSA que impone normativamente



GEORGE RETSECK

este equipo a partir de 2012 para los vehículos de peso bruto inferior a 10.000 libras (unos 4500 kilogramos). Se espera que esta nueva norma generalice el uso de ABS y TCS en todos los coches y camiones ligeros.

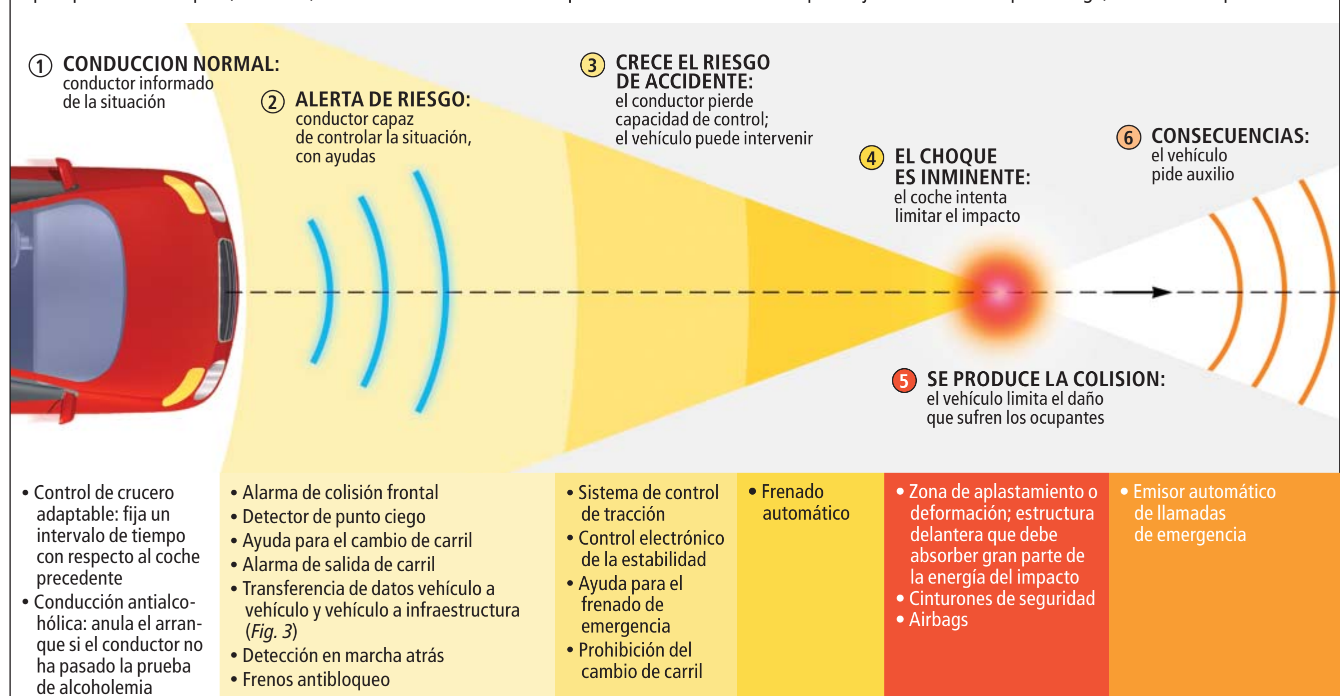
Una red de seguridad

Stepper señala además que el ESC es la clave de una nueva generación de sistemas de seguridad que se aprovechan de la red de comunicaciones establecida entre sensores del vehículo, dispositivos actuadores y ordenadores. Dado que el ESC utiliza sensores de aceleración, o de fuerza G, para vigilar el movimiento general del vehículo, puede proporcionar a una unidad central de observación y control la información necesaria para reaccionar con eficacia ante riesgos imprevistos de la carretera. "Hasta hace poco", señala, "los diferentes subsistemas de seguridad del vehículo trabajaban por separado, pero al interconectarlos en red podemos reforzar las prestaciones o añadir funciones nuevas, y muchas veces con un equipo idéntico o incluso más elemental".

Veamos un ejemplo ilustrativo de dicha transición: el actual sistema de almohadillas inflables (*airbags*) para impacto lateral de Bosch se despliega por la acción de dos sensores separados que comprueban la colisión lateral: uno en la puerta, que detecta la presión, y otro en la unidad de control de estabilidad, que mide la aceleración. "Por desgracia, antes de disparar los *airbags* hay que esperar a la comprobación, con lo que se pierden unos milisegundos preciosos, que en una colisión parecen eternos", puntualiza Stepper. Sin embargo, en la última configuración en red, un controlador de "caja negra" que vigila el movimiento del vehículo, puede recibir del sensor de aceleración ESP información sobre la guiñada —es decir, la rotación del vehículo en torno de su eje vertical indicativa de un derrape— y preparar los *airbags* laterales para su despliegue inmediato en cuanto actúe el sensor de presión de la puerta.

SEGURIDAD ESCALONADA

Los expertos en seguridad del automóvil distinguen seis etapas en una posible colisión de tráfico. En cada una de ellas pueden intervenir diferentes sistemas para prevenir el choque o, al menos, limitar los daños. Los sistemas "pasivos" normales, como cinturones de seguridad y almohadillas hinchables (*airbags*), se encargan de la última etapa. También son útiles para evitar accidentes el control de crucero adaptable y los detectores de punto ciego, entre otros dispositivos.



ACCIDENTES DE COCHE: UNA PERSISTENTE AMENAZA

EN ESPAÑA (datos correspondientes a 2007):

- Cien mil accidentes de automóvil con víctimas, en total **146.344** (**11.429** eran peatones), de ellas **3823** muertos (**591**, peatones; **3082**, en carretera) y **19.295** heridos graves.
- En un **14 %** de todos los accidentes con víctimas (un **21 %** de los ocurridos en carretera) y un **29 %** de los accidentes mortales la velocidad fue un factor concurrente.
- **Una cuarta parte** de los conductores fallecidos en accidente en 2006 a los que se les midió el alcohol en sangre (la mitad del total) tenía más de **0,8** gramos de alcohol por litro de sangre.
- En el **36 %** de los accidentes la distracción fue un factor concurrente.

La industria de automoción empieza a aprovechar las sinergias posibles: varios subsistemas de seguridad antaño independientes se integran en redes de suerte que todos ellos tengan acceso a la información esencial. Este cambio, según Stepper, podría reducir costes, pues se necesitarían menos sensores para realizar las mismas tareas.

Alarma de colisión

Entre los sistemas de seguridad más interesantes figuran los que advierten de colisiones —y ayudan a evitarlas— con otros vehículos u obstáculos que aparecen delante. El autor ha ensayado diversas versiones en el simulador de Ford y en dos pistas de prueba diferentes. Las alarmas de colisión frontal consisten en dispositivos adaptables relativamente nuevos que, a velocidades de crucero, se apoyan en datos de radar para mantener una distancia o un retardo preestablecido entre dos vehículos.

Los nuevos controles de crucero adaptables para situaciones de "parar y arrancar, parar y arrancar" facilitan enormemente la circulación a ritmo lento, porque se acomodan con precisión a las paradas y arranques del coche que vaya delante. Añadiendo una cámara y unos refinados algoritmos de control informático se obtendrá un sistema básico de aviso de colisiones.

Es preciso combinar radares con cámaras, ya que unos y otras aportan capacidades diferentes. Como señala Dean McConnell, de Continental Automotive Systems en Auburn Hills, los radares nos indican si hay o no algo delante y pueden medir la distancia al obstáculo, pero no sirven de mucho para clasificar el objeto detectado. La videocámara, en cambio, se halla capacitada para distinguir entre cosas importantes, como un coche, y otras que no lo son, como la tapa suelta de una boca de servicio. Uniendo ambos se podrá determinar fiablemente cuándo son de temer colisiones frontales y es preciso frenar.

En una instalación típica, un sensor con radar de microondas de largo alcance, a 77 gigahertz, puede vigilar entre 120 y 200 metros por delante, mientras que un radar de menor alcance, a 24 gigahertz, explora varias decenas de metros. Las cámaras de gran angular reconocen objetos a distancias de hasta 40 y 50 metros. Cuando un sistema de alarma determina que el coche se acerca demasiado aprisa al que le precede, da un toque al pedal de freno, dispara un aviso de frenada o activa otras señales, y presuriza por anticipado las mangueras de freno hidráulico para que los frenos puedan activarse instantáneamente. Si el conductor no ejerce acción alguna y la colisión es inminente, el sistema ralentiza

GEORGE RETSECK

automáticamente el vehículo para reducir, al menos, el efecto de cualquier choque. Muchos lo comparan a extender la zona delantera de absorción de golpes.

Frenado automático

Los sistemas de alarma de colisión actuales marcan el camino hacia futuros sistemas de seguridad activa que automáticamente pisen los frenos o reintroduzcan los coches en su carril de circulación para evitar los accidentes. Pero lograr que funcionen, a plena velocidad y sin fallos, versiones concretas de estas técnicas resulta bastante más problemático; todavía faltan cinco o diez años para lograrlo.

Volvo ha dado un paso inicial hacia el frenado automático: su modelo XC60 incorpora el sistema "City Safety" (seguridad urbana), que previene y modera las colisiones a menos de 30 kilómetros por hora. Según Thomas Broberg, de Volvo, en Gotemburgo, el sistema está pensado para los encontronazos a poca velocidad con parachoques o barreras, que en muchas partes suponen unas tres cuartas partes de las colisiones en ciudad (de ahí su nombre). En su mayoría, se deben a distracciones del conductor. Aunque provoquen pocas muertes, a menudo causan lesiones de cuello, con el elevado coste social consiguiente.

City Safety incorpora telémetros con láser de infrarrojos que emiten haces de rayos y localizan reflexiones en objetos a seis u ocho metros por delante del vehículo. Un receptor mide a qué velocidad se están aproximando las dos masas y, en caso necesario, prepara los frenos de emergencia para que respondan con rapidez. Si en tal coyuntura el conductor no actuara, el sistema frenaría automáticamente sin dar aviso alguno, que sólo serviría para confundir al conductor. Seguidamente, City Safety notifica al conductor que ha realizado una operación de emergencia.

ACCIDENTES DE COCHES: UNA PERSISTENTE AMENAZA

En EE.UU.

- Casi **seis millones** de accidentes de tráfico durante 2006.
- Cada año se producen alrededor de **40.000** muertes por accidentes de coche.
- Cada **12** minutos muere una persona en accidente de automóvil; cada **14** segundos, queda alguien herido.
- Más de la **cuarta parte** de los conductores han participado en algún accidente de coche durante cualquier período de cinco años.
- **Dos de cada cinco** muertes en la carretera se deben a la embriaguez del conductor.
- Aproximadamente el **30** por ciento de las muertes en accidente de automóvil puede atribuirse a la excesiva velocidad.
- Más de **un tercio** de los accidentes mortales se deben a salidas de la carretera.

Será difícil pasar de ahí a un sistema de frenado automático en continuo servicio y para toda velocidad; garantizar un comportamiento correcto ante cualquier situación crítica constituye todo un reto. Según Broberg, es fácil conseguir que el coche frene automáticamente, pero no lo es asegurarse de que no frene a destiempo y de que en todo momento se ejecute la acción adecuada. Por ahora Volvo, así como otros fabricantes del sector de la automoción y de los equipos de seguridad, realizan pruebas para cerciorarse de la extrema seguridad de sus nuevos sistemas. Los están instalando en coches, muy a menudo de propietarios particulares, en diferentes entornos por todo el mundo. La mayor parte del tiempo los sistemas permanecen inactivos, pero se registra si hubieran tomado las decisiones correctas.

Mantenerse en el carril

Las cámaras de visión frontal son componentes esenciales de los dispositivos que avisan al conductor de que el vehículo abandona su carril de circulación. Las cámaras van siguiendo las marcas longitudinales que lo delimitan y señalan cuándo el vehículo se aparta de esa trayectoria.

Nissan, uno de los primeros fabricantes que introdujo la técnica, presenta ahora una versión mejorada. Alex Cardinali, de Nissan North America, en Nashville, explica que su nuevo sistema evita que los conductores se salgan involuntariamente del carril de circulación, por distracciones, somnolencia u otras causas; para ello ejerce un frenado sobre un costado del coche, creando un movimiento de guiñada que lo restituye a su carril. Además





2. AVISO DE COLISION: la banda de luz roja reflejada en el parabrisas (*izquierda*) advierte de un posible riesgo ante un obstáculo aparecido en la carretera durante la "conducción" en un simulador Ford de realidad virtual. La pantalla de navegación (*derecha*) está conectada al nuevo sistema de videocámaras múltiples de Honda y presenta una vista en gran angular, envolvente, de la zaga y los costados del vehículo.

CORTESIA DE FORD MOTOR COMPANY (*aviso de colisión*); CORTESIA DE HONDA MOTOR CO., LTD (*pantalla de navegación*)

TRABAS LEGALES

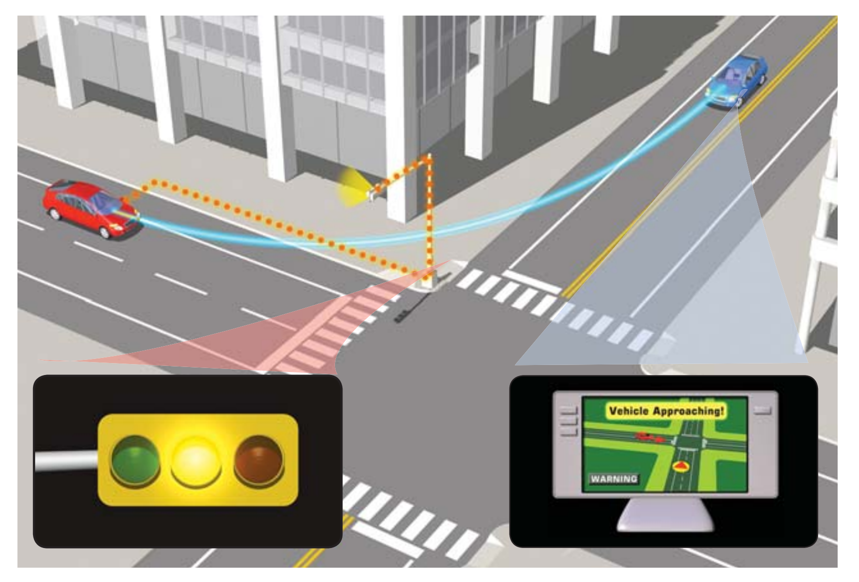
La introducción de sistemas de seguridad automatizados plantea a los fabricantes de automóviles y a sus proveedores problemas muy graves relativos a la fiabilidad de esos productos. Cuando aparecieron los *airbags*, por ejemplo, nadie imaginó el peligro que suponía para los niños su despliegue a velocidades excesivas. Tras numerosos procesos judiciales se generalizó la adopción de medidas más seguras, como la de situar a los pasajeros infantiles en el asiento trasero.

Para limitar consecuencias imprevistas, en EE.UU. se prefiere hoy que la introducción de un sistema preventivo tenga tres fases preparatorias: (1) investigación suficiente para comprobar que la nueva técnica refuerza la seguridad; (2) aprobación por la NHTSA de su empleo; y (3) completa instrucción de los usuarios sobre sus ventajas y limitaciones.

de observar las marcas del carril mediante una cámara montada sobre el espejo retrovisor, el sistema tiene en cuenta la velocidad del vehículo, así como lo que el conductor haga con el volante.

El autor tuvo la oportunidad de probar un sistema análogo en las inmediaciones de la pista de pruebas de Bosch en EE.UU. Con tres ingenieros de la firma en los asientos de atrás, enfilamos un tramo recto, casi vacío, de una autopista de dos carriles en la suave campiña al sur de Detroit. Cuando no hubo obstáculos a la vista, un experto sentado a mi lado tecleó en el ordenador portátil y el sistema se activó. Entonces dirigí el coche hacia el carril contiguo; volante y asiento empezaron a vibrar como si nos hubiéramos metido en una mala carretera bacheada. El mensaje era claro: vuelve a tu carril. Probamos también otras realizaciones similares de los mismos conceptos básicos, aunque con tonos acústicos y luces en el salpicadero como señales de alarma. Accionando el intermitente de giro, se anula la función de control del carril.

Pronto descubrí que me encontraba a gusto conduciendo en el "modo de bañera", como el investigador lo llamaba por analogía con la gráfica de extremos inclinados que representaba en la pantalla de su ordenador las respuestas de la máquina a las desviaciones de trayectoria. Este modo encarrila el coche un poco como en un escalextric: cada vez que giraba el volante para salir del carril, una fuerza opuesta restituía con suavidad el vehículo a su orientación anterior. Me resultó fácil acostumbrarme a conducir por el centro de la "bañera", para satisfacción de los ingenieros.



3. SEXTO SENTIDO DE LOS CONDUCTORES. Fabricantes de coches, entre otros Toyota y General Motors, están probando sistemas de seguridad vial que transmitirán señales de alerta entre vehículos próximos y desde la infraestructura viaria a los vehículos. Las señales pondrían en guardia a los conductores mediante alarmas acústicas e iconos en el salpicadero (*insertos*). Si el conductor no respondiera al aviso, por ejemplo, de que hay un coche que bloquea la vía al otro lado de una esquina, su vehículo podría detenerse por sí solo para evitar la colisión. Estos sistemas vehículo a vehículo (V2V) y vehículo a infraestructura (V2I) enviarían datos sobre la velocidad del vehículo, su localización en GPS y la información de frenado a los receptores situados en un círculo de unos 400 metros de radio.

GEORGE RETSECK

Evitar zonas laterales ciegas

En vez de actuar sobre el coche para que se mantenga en su carril, cabe recurrir a sistemas que escruten sus puntos ciegos: observar los carriles contiguos mediante sensores ultrasónicos o radares de montaje lateral e informar al conductor de lo que pase allí. En la mayoría de los sistemas comercializados, se encienden unas luces de alarma en los retrovisores laterales cuando el vehículo ocupa esas zonas. McConnell afirma que los detectores de zonas ciegas van ganando aceptación entre los conductores que los han probado, si bien su desarrollo podría acelerarse en el sector del transporte, pues los camiones tienen zonas ciegas muy amplias.

Complemento de esta técnica es la ayuda para el cambio de carril: un sistema que informa a los conductores de que en los carriles contiguos hay vehículos que se les están acercando con rapidez y que incluso les impide cambiarse a esos carriles. En este caso, según McConnell, la zona detectada cubre hacia atrás hasta dos largos de vehículo. Una técnica afín evita el atropello de un niño que juega detrás del coche sin ser visto. Se trata de sistemas de detección en marcha atrás que reconocen un niño o un objeto antes de tocarlo y detienen el vehículo. La NHTSA mantiene conversaciones con los fabricantes para encarar esos temibles accidentes, afortunadamente raros.

McConnell augura que en el futuro habrá sistemas de seguridad que identifiquen y sorteen en la carretera peatones y animales, incluso por la noche; otros sistemas de reconocimiento de señales de tráfico, por ejemplo, impedirán a los conductores saltarse señales y semáforos.

La combinación de todos los sensores avanzados citados, sobre todo interconectados en red, podría constituir una "burbuja de seguridad" virtual en torno al vehículo, capaz de detectar los riesgos próximos. Pero incorporar a bordo un sistema así probablemente sería complejo y costaría más de lo que quisieran gastar los propietarios de coches.

Hablan los coches

Ante la magnitud del coste, varios fabricantes del sector analizan una estrategia alternativa y más económica: enlazar los vehículos y la infraestructura viaria por medios inalámbricos, poco más complicados que la mensajería





4. EL VEHICULO ROBOTIZADO "BOSS" (*izquierda*), que ganó el año pasado la competición de vehículos autónomos Urban Challenge de DARPA, es el precursor de los coches y camiones no conducidos que podrían circular dentro de diez años. Estos vehículos automatizados estarían capacitados para marchar en fila india compacta sin conductor alguno, como hace años se demostró en una autovía de San Diego (*derecha*). Las técnicas de "autopista inteligente" permitirán ahorrar espacio y reducir accidentes en las carreteras.

CORTESIA DE GENERAL MOTORS (*"Boss" de GM Chevrolet*); CORTESIA DE BILL STONE *California Path (coches en formación)*

de textos. En vez de confiar en el equipo de sensores transportado en el propio coche, Alan Taub, director ejecutivo de Investigación y Desarrollo en General Motors, se pregunta: "¿Por qué no enterarse de lo que pasa en los alrededores interrogando a otros vehículos y a las señales y cruces de carretera cercanos?".

Los sistemas llamados V2V (vehículo a vehículo) y V2I (vehículo a infraestructura) permitirían a los conductores, según Taub, traspasar el horizonte visual; ver, por ejemplo, un vehículo parado detrás de la esquina siguiente. El sistema de a bordo quizá no lo detectara a tiempo, pero probablemente lo haría otro vehículo que pasase más cerca. Un sistema de gestión de intersecciones provisto de un nodo de comunicaciones inalámbricas podría, pues, informar a un conductor distraído de que su coche está a punto de saltarse un semáforo en rojo: incluso aplicaría los frenos si fuera deseable (*véase la figura 3*).

Parte del atractivo de esta idea reside en su sencillez técnica: los coches y las vías de circulación se equiparían sólo con sensores básicos, tales como los del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), ciertos medios de computación y radiotransmisores y receptores de corto alcance. Y no habría que reformar todos los vehículos desde un principio, señala Taub: "Se notaría ya una mejora de la seguridad, aunque sólo se haya penetrado en un 5 a 10 por ciento de la población de vehículos".

Pero también surgen inconvenientes. Tanto V2V como V2I requieren que todas las compañías que venden coches en un país acuerden una normativa común para garantizar la interoperabilidad de vehículos de diferente marca. Ello llevará tiempo. Y aunque no costaría demasiado preparar los coches para funcionar en redes viarias V2I, la instalación de los dispositivos necesarios en toda la infraestructura viaria resultaría cara. Se estima que su implantación en Estados Unidos ascendería a un billón de dólares.

No obstante, se mantienen conversaciones sobre técnicas V2V entre las entidades interesadas: Toyota, General Motors, Nissan y varias más. En particular, hay organismos investigadores de Europa, Japón y China que desarrollan prototipos de V2I.

La conducción automática

Una vez que los sistemas de seguridad y las técnicas de navegación autónoma hoy en desarrollo hayan alcanzado una fiabilidad rotunda, con plena aceptación de los conductores, no es demasiado aventurado prever que vaya a haber vehículos autónomos. De hecho, ya se ha demostrado la viabilidad de tales automóviles.

En 2007, un Chevrolet Tahoe trucado apodado "Boss" y otros coches similares no tripulados circularon con pleno éxito por las calles de la californiana Victorville, en una de las cuales había más vehículos e incluso atascos. Los coches y camiones autónomos competían en una carrera urbana ideada por DARPA (Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa) para demostrar que los vehículos de carretera robotizados pueden ser una realidad. Muy poco después, Richard Wagoner, director de General Motors, predijo que su compañía pondría en el mercado vehículos autónomos antes de 10 años. El pronóstico tal vez peque de optimista, pero con seguridad marca el camino para obtener coches verdaderamente robotizados en un futuro no muy lejano.

Bibliografía complementaria

AUTOMOTIVE ACTIVE SAFETY SYSTEMS. Jean J. Botti. Society of Automotive Engineers, 2007.

CONTINENTAL AUTOMOTIVE SYSTEMS: www.conti-online.com/generator/www/de/en/cas/cas/general/home/index_en.html

ROBERT BOSCH: www.bosch.us/content/language1/html/index.htm

TRAFFIC SAFETY FACTS 2006. Centro Nacional de Estadísticas y Análisis de NHTSA: www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/TSF2006FE.PDF

El efecto Casimir

El efecto Casimir es la manifestación más palpable que se conoce de las fluctuaciones de energía que se producen en el estado vacío de un sistema cuántico por la acción de condiciones externas

Emilio Elizalde

CONCEPTOS BASICOS

- El vacío cuántico tiene fluctuaciones de energía, que en determinadas circunstancias actúan sobre objetos materiales ordinarios. Así ocurre en el ejemplo del efecto Casimir: dos placas metálicas paralelas, a las que las fluctuaciones del vacío, por la diferente presión que ejercen sobre su anverso y su reverso, tienden a acercar entre sí.
- El cálculo de esa fuerza de aproximación encierra infinitos domeñables: tras un proceso de renormalización se convierten en magnitudes finitas, medibles en experimentos reales.
- Es una situación común en la teoría cuántica de campos. La función zeta de Riemann se usa en algunos de esos procedimientos regularizadores, que preceden a la renormalización.

El efecto Casimir ha estado siempre rodeado de un halo de misterio porque designa una fuerza que surge del vacío, de la nada. Y sin embargo, es medible experimentalmente. Vamos a ver cómo es posible algo así.

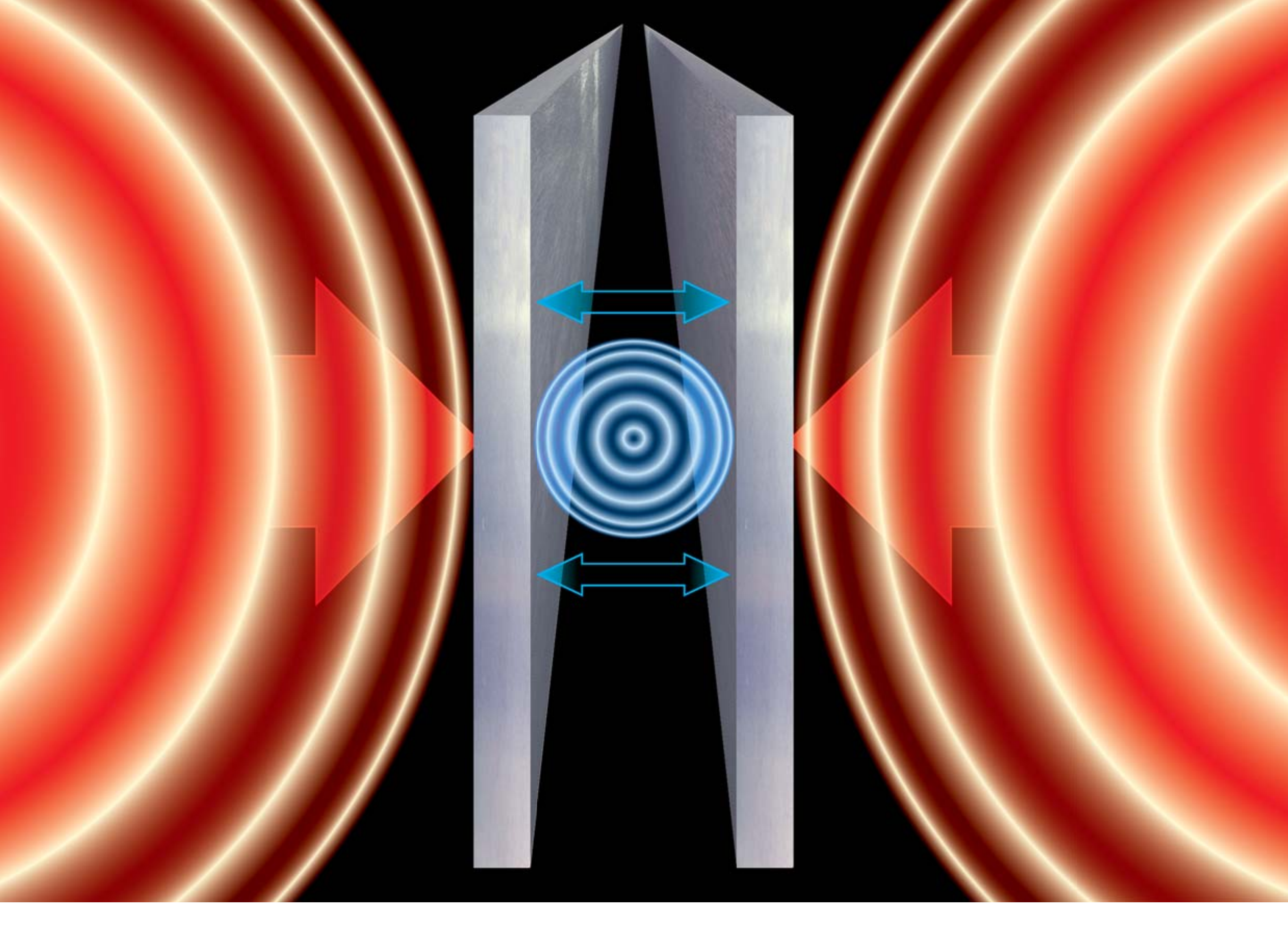
Del principio de incertidumbre

El estado de mínima energía de un sistema cuántico recibe el nombre de "estado vacío". Para salir del mismo se requiere un aporte de energía. ¿Cómo puede, pues, haber fluctuaciones en dicho estado? Las fluctuaciones del estado vacío vienen habilitadas por el principio de incertidumbre (o de indeterminación) de Heisenberg, uno de los pilares del mundo cuántico, que establece la imposibilidad intrínseca de determinar a la vez dos magnitudes observables y complementarias del sistema, como lo son las parejas posición-velocidad o energía-tiempo.

Veámoslo con un ejemplo sencillo: el oscilador armónico unidimensional. En este sistema físico, una partícula, que sólo se puede mover hacia delante o hacia atrás a lo largo de una línea recta, experimenta una atracción hacia un punto de esa recta con una fuerza proporcional a su alejamiento del punto. Si a la partícula se le imparte una velocidad en dirección opuesta al punto de atracción, el movimiento resultante será una oscilación alrededor de este punto con una frecuencia determinada.

Este sistema clásico tiene una versión cuántica, donde la energía de la partícula sólo puede tomar una cantidad numerable de valores. En concreto, el valor enésimo de la energía será proporcional a la frecuencia de oscilación multiplicada por $(n + 1/2)$. Aquí el valor más bajo de la energía, el correspondiente a $n = 0$, no es nulo, como ocurriría en el caso clásico, sino proporcional a la mitad de la frecuencia. Esa energía es la mínima compatible con el principio de incertidumbre. La energía clásica del oscilador, a partir de la cual se define la cuántica, depende del cuadrado de su distancia al centro, parte que corresponde a la energía potencial, y del cuadrado de su velocidad, la parte de la energía cinética. El principio de incertidumbre de Heisenberg impone un límite mínimo universal al producto de la incertidumbre de ambas magnitudes. De ahí, en pocos pasos, se sigue esa energía mínima del oscilador de medio cuanto de energía.

En un oscilador clásico, para una frecuencia de oscilación dada, una mayor energía equivale a una amplitud —una máxima separación del centro de atracción— mayor. En un mundo cuántico, equivale a la adición de cuantos de energía de una misma magnitud, proporcional a la frecuencia. La probabilidad de encontrar la partícula a una distancia del centro viene dada en el nivel n de energía por una distribución de probabilidad que se divide en $n + 1$ paquetes acampanados, separados por nodos de probabilidad nula. En el estado de mínima energía, hay una sola campana de probabilidad, centrada en el origen. Los resultados de repetidas mediciones de la posición de una oscilador de una energía dada, pues, se concentrarían alrededor de ciertos puntos: lo que clásicamente es oscilante y continuo, cuánticamente parece "corpuscular", con un número de corpúsculos mayor cuanto mayor sea la energía. Es como un camino de ida y vuelta: la mecánica cuántica sustituye la partícula puntual del oscilador clásico por una onda, pero esta onda, a su vez, lleva de nuevo a pensar en "partículas". Este es



1. EL VACIO interacciona con la materia. Acercará dos placas metálicas paralelas que estén muy próximas entre sí. Ese es el efecto Casimir.

el fundamento de la versión cuántica de los campos de fuerza clásicos; enseguida hablaremos más de ello.

Si el oscilador está encerrado en una cavidad —en nuestro ejemplo, si está encerrado en un segmento de longitud dada—, la frecuencia podrá tomar también sólo ciertos valores. Esta no es una peculiaridad cuántica: es lo que ocurre con una cuerda vibrante clásica, en un instrumento musical por ejemplo, en cuya vibración se superponen una frecuencia fundamental y sus armónicos. La suma de las energías correspondientes a cada una de las frecuencias de oscilación posibles dentro de la cavidad de un oscilador que se halle en su estado de energía más baja, la "energía de punto cero" de ese sistema, resulta ser proporcional a la serie infinita siguiente: $1/2 + 3/2 + 5/2 + 7/2 + \ldots$ Este es sólo un ejemplo del tipo de infinitos con los que la teoría de campos cuánticos ha de lidiar. Ahí entra en funcionamiento el programa de *renormalización*, programas en realidad, pues hay varias maneras diversas de atacar el problema, sobre todo en su primer paso, el denominado de *regularización*, que asigna, con arreglo a cierta prescripción, un valor finito a una serie como la anterior. Detengámonos en el método de *regularización zeta*, que hace uso de la función zeta de Riemann.

Del infinito a la finitud

¿Cuánto vale la suma $1 + 1 + 1 + 1 + 1 + \ldots$? Una primera respuesta sería: infinito. Es correcta, pero escasamente útil. Resulta que las series más importantes que aparecen en las teorías de campos cuánticos desde los años treinta del siglo pasado son divergentes y respuestas como la anterior en nada ayudan a darles sentido. Otra respuesta adecuada sería: vale $-1/2$. Pero, ¿cómo se llega a un tal valor, en apariencia absurdo y contrario a la intuición? Y ¿qué sentido o utilidad puede tener de hecho?

Importantes métodos de sumación de series divergentes fueron construidos a lo largo del tiempo por diversos matemáticos y ahora llevan sus nombres: Euler, Abel, Cesàro, Borel, etc. Pensemos en la serie $1 - 1 + 1 - 1 + \ldots$ Al quitarle el primer término obtenemos la misma serie pero cambiada de signo, es decir, llamando a su suma a, se tiene que $a = 1 - a$, de donde $a = 1/2$, valor muy razonable, pues, al ir añadiendo términos, la serie va oscilando siempre entre 0 y 1. Mas esto no nos sirve para sumar la serie con la que iniciamos la

1 + 1 + 1 + 1 + … = –1/2

2. ¿PUEDE HABER algo más evidentemente infinito que la suma de infinitos unos? Sin embargo, en matemáticas hay un procedimiento coherente que asigna el valor – 1/2 a esa suma. En la realidad física sucede algo parecido: sumas que de entrada son infinitas encierran fenómenos finitos mensurables. El efecto Casimir es uno de ellos.

presente disquisición. En efecto, se obtiene $a = 1 + a$, de donde se obtendría que *a* seguiría valiendo infinito.

Ello nos lleva a considerar otros procedimientos de suma. Reparemos en uno. De nuevo, la historia comienza en Euler y la famosa serie armónica: $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + \ldots$ Es divergente: quiere decir que, para cualquier número *N*, por grande que sea, habrá algún número *n* de términos tal, que su suma será mayor que *N*; la serie infinita completa será un número infinito. Euler advirtió que, si se eleva cada término a una misma potencia *r*, siempre que *r* sea mayor que 1, la serie resultante $1 + 1/2^r + 1/3^r + 1/4^r + \ldots$ será convergente —la suma de los infinitos términos no será infinita— y se dedicó a estudiar su valor y propiedades en función de *r*.

Riemann dio un paso fundamental: extendió el dominio de *r* al plano complejo (llamándola ahora *s*), y así definió la función de variable compleja $\zeta(s)$, que hoy recibe el nombre de función zeta de Riemann, con aplicaciones en teoría de números, análisis, física matemática, teoría del caos y otros.

La función zeta de Riemann, $\zeta(s)$, se define, pues, mediante la serie $1 + 1/2^s + 1/3^s + 1/4^s + \ldots$ en toda la región del plano complejo *s* que está a la derecha de la línea vertical de abscisa1 (*véase el recuadro* "Las potencias complejas en la zeta de Riemann"). En ese dominio la serie es convergente y admite una prolongación analítica única a todo el plano complejo: una construcción matemática que crea una función con valores finitos unívocamente determinados que empalma de manera suave con la función original, definida sólo a la derecha de 1. No tiene más que una singularidad, un número para el que la nueva función ampliada no puede ofrecer un valor finito: el punto $s = 1$ (que corresponde a la serie armónica).

Nuestra serie inicial, $1 + 1 + 1 + \ldots$, es la correspondiente a $s = 0$, y se tiene que $\zeta(0) = -1/2$. Del mismo modo podemos razonar que: $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \ldots = \zeta(-1) = -1/12$, pues ése es el valor de la función zeta en $s = -1$; y así con otras muchas series. Para hallar el valor de la serie en una "cavidad" de las energías mínimas del oscilador hay que trabajar un poco más: $1/2 + 3/2 + 5/2 + \ldots = 1/2\,(1 + 3 + 5 + \ldots) = 1/2\,[(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \ldots) - 2\,(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \ldots)] = 1/2\,[-1/2 - 2(-1/2)] = 1/4$.

En física se ha construido una refinada teoría para regularizar y luego renormalizar dichas series con un éxito espectacular, que alcanza las 14 cifras decimales de aproximación, al comparar los resultados obtenidos con los de

los experimentos en electrodinámica cuántica. Pues bien, en muchos casos estos métodos dan un resultado coincidente en todo con el del procedimiento de continuación analítica aquí esbozado. Uno de los ejemplos más claros y fundamentales lo constituye el efecto Casimir.

Oscilaciones electromagnéticas en el vacío

Cada punto de una cuerda vibrante describe en el tiempo un movimiento constituido por la superposición de una infinidad de movimientos, cada uno equivalente a un oscilador armónico de distinta frecuencia y amplitud. A su vez, entre cada punto de la cuerda será diferente la amplitud de los componentes armónicos de igual frecuencia; en los puntos donde la cuerda se ata a las clavijas del instrumento la amplitud será nula.

De manera similar, en cada punto del espacio vacío el campo electromagnético es una superposición de oscilaciones armónicas —ahora espaciales, en vez de unidimensionales— de frecuencia distinta y de todas las energías posibles para cada frecuencia.

Ya sabemos lo que ocurre cuando se someten los osciladores a la mecánica cuántica:

LAS POTENCIAS COMPLEJAS EN LA ZETA DE RIEMANN

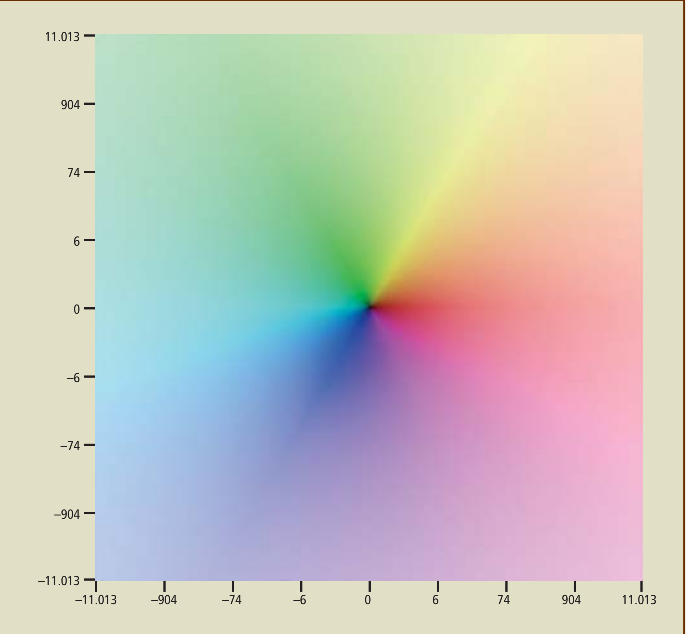
Para entender en qué consiste elevar un número real a un número complejo, hay que tener en cuenta que un número complejo s puede escribirse de la forma $s = a + ib$, con $i^2 = -1$ y a y b números reales, y que e^x puede escribirse como una serie con infinitos términos, una suma de potencias de x sucesivamente mayores multiplicadas por coeficientes, de modo que si en ese desarrollo de e^x se sustituye x por ix, se tendrá una serie igual a la que resulta cuando se suma la correspondiente a la función trigonométrica coseno de x (en radianes) y la correspondiente al seno de x, ésta con cada uno de sus términos multiplicado por i. Por otra parte, cualquier número real, llamémosle q, es igual, por la definición misma de logaritmo natural, a e elevado al logaritmo natural de q. Para elevar una potencia a otra se multiplican los exponentes, y la suma de dos exponentes equivale al producto de las correspondientes potencias. En consecuencia: q elevado al número complejo s, es el número complejo $q^a e^{ib\ln q}$. La parte real es $q^a\cos(b\ln q)$; la imaginaria —la multiplicada por i—, $q^a\mathrm{sen}(b\ln q)$.

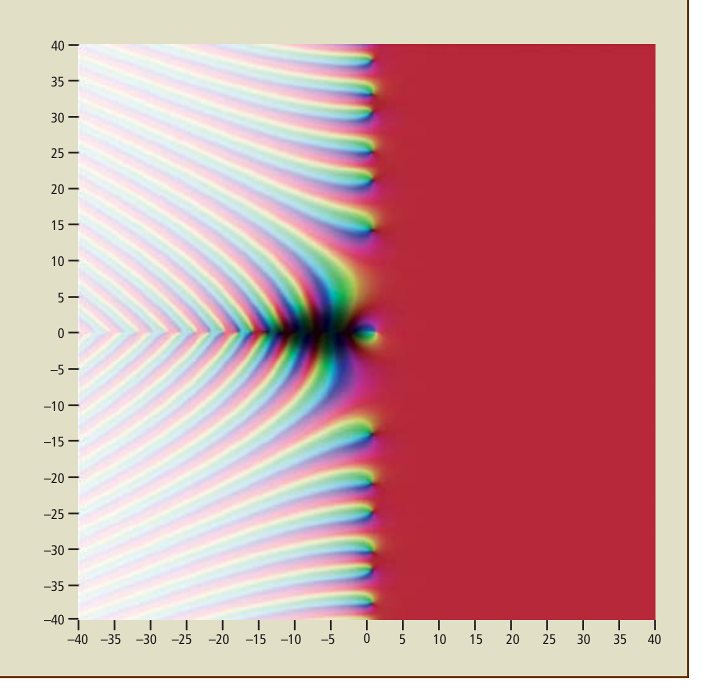
La función zeta de Riemann es una función de términos de esa forma, en los que q va valiendo 1, 1/2, 1/3..., y a vale más de uno (aunque puede extenderse a todo número complejo, salvo $s = 1$).

Un número complejo puede escribirse también como el producto de un número real (el módulo) por e elevado a i por un ángulo o "argumento". El módulo será la raíz cuadrada de sumar el cuadrado de la parte real (que en el caso de la función de Riemann será a su vez la suma de las partes reales de todos los términos de la serie) al cuadrado de la parte imaginaria (la suma de las partes imaginarias de todos los términos). El argumento es cualquiera de los ángulos en radianes cuya tangente sea igual al cociente de la parte imaginaria y la real (se sigue de interpretar las partes real e imaginaria del número complejo como las componentes horizontal y vertical de un vector). El resultado no puede representarse en coordenadas cartesianas de manera directa; harían falta cuatro ejes perpendiculares. Una forma de conseguir una representación en el plano es por medio de colores. En el eje horizontal se representa la componente real de s y en el vertical la imaginaria. El tono del color da el argumento de la función de Riemann para s, y la intensidad del color, el módulo, de suerte que, cuanto más intenso sea, menor será el módulo.

La codificación que en concreto se ha empleado aquí se ve arriba a la derecha. El color rojo indica argumentos casi nulos (los colores van cambiando con el ángulo de giro —el argumento— desde la horizontal, y las intensidades radialmente).

Con este código, la función de Riemann, para una región del plano complejo centrada en el origen y una vez extendida analíticamente —la construcción única que le da valores finitos en todo el plano menos en $s = 1$—, queda como se ve aquí a la derecha.





EMILIO ELIZALDE



3. SEIS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES para la determinación del efecto Casimir. El primero corresponde al experimento de Lamoreaux, publicado en 1997 y que marcó el inicio de las verdaderas comprobaciones experimentales del efecto. Se llevó a cabo en Seattle; los otros cinco, en orden cronológico, en Riverside, Estocolmo, Murray Hill, Padua e Indianápolis.

IMAGEN CORTESIA DE R. ONOFRIO, *New J. Phys.*, n.º 8, Pág. 237; 2006

cada energía posible para una frecuencia dada es una suma de cuantos iguales, de energía proporcional a la frecuencia en cuestión. Cuando se trata de los osciladores que componen el campo electromagnético, se interpreta que sus cuantos de energía son fotones. Hablar de campos electromagnéticos es, en la práctica, hablar de la interacción entre objetos materiales cargados: su interacción consiste en la emisión y absorción de esos fotones. Y como ocurre con los osciladores lineales, mientras que en el vacío libre, sin un sistema material que acote el campo, todas las frecuencias tienen el mismo peso, son igualmente importantes, en el interior de una cavidad, donde el campo se refleja una y otra vez por las placas, la situación es muy diferente. Las frecuencias que "caben" perfectamente dentro de la cavidad son aquellas en que la distancia entre placas es un múltiplo entero de media longitud de onda (las placas han de ser nodos de la vibración); allí amplificadas, constituyen las frecuencias propias, sus "modos resonantes" de vibración, de la "cavidad resonante". Para las demás longitudes de onda, el campo correspondiente queda atenuado. Es decir, las fluctuaciones de vacío resultan unas reforzadas y otras atenuadas y contribuyen de manera diversa a la "presión de radiación" del campo.

También sabemos ya que no hay osciladores cuánticos de energía nula. Por eso, aun sin fuentes materiales —sistemas de partículas con carga eléctrica— que generen el campo, la energía mínima de los osciladores que componen el campo no será nula. De esos estados de energía mínima se dice que son "fluctuaciones del vacío". En principio, parece que cabría pasar por alto su existencia. Al igual que ocurría con el oscilador armónico, libre o encerrado en una cavidad, la primera impresión es que la energía del campo, libre o encerrado, es infinita. Pero se trataría de un infinito sin efecto, por el que no habría que preocuparse. Lo que importa son las diferencias de energía entre estados físicos, no su valor absoluto. Dónde se ponga el cero de energías es una cuestión de mera conveniencia. Bastaría establecer que el cero de energía es la energía del vacío, y ya no habría que pensar más en ella. El mérito de Casimir estriba en haber descubierto que la energía del vacío, en determinadas circunstancias, sí tiene, pese a todo, consecuencias físicas discernibles.

El cálculo de Casimir

Aunque no en su autobiografía, el propio Casimir relató en más de una ocasión el desarrollo de los hechos. Según confesara a Peter Milonni en 1992, Casimir descubrió su efecto como un subproducto de la investigación aplicada que llevaba a cabo para Philips: la estabilidad de las suspensiones coloidales que se empleaban en las películas que se depositaban sobre las lámparas al uso y tubos de rayos catódicos. La teoría que habían desarrollado Overbeek y Verwey, en el mismo laboratorio, sobre la estabilidad de las suspensiones de polvo de cuarzo no parecía ser correcta desde el punto de vista experimental: la interacción entre partículas debía decaer más rápidamente con la distancia, con la potencia r^{-7} en lugar de la r^{-6} de la que se deriva la ecuación de Van der

Waals de las fuerzas intermoleculares. Overbeek había aventurado que ello podía deberse a la velocidad de propagación de la interacción (la de la luz), que es finita. Tal extremo fue confirmado en un primer trabajo teórico de Casimir y Polder, que aún abordaba el problema en el marco tradicional de las fuerzas de Van der Waals.

Intrigado por la simplicidad del resultado, Casimir se propuso profundizar en el tema. En conversación con Bohr en otoño de 1947, el danés se percató de que allí había algo nuevo y lo relacionó con la energía de punto cero. Puso a Casimir sobre una pista que ya no había de abandonar. Enseguida comprobó que el resultado que había obtenido con Polder podía ser en efecto interpretado como una variación de la energía de punto cero. El 29 de mayo de 1948 presentó su manuscrito "Sobre la atracción de dos placas perfectamente conductoras" a la sesión de la Real Academia Holandesa de Artes y Ciencias. Fue publicado en la revista de la Asociación ese mismo año.

Por aquellas fechas, la observación del desplazamiento de Lamb (una pequeña diferencia de energía entre dos estados del átomo de hidrógeno) había sido interpretada también como un cambio de las fluctuaciones del vacío o energía de punto cero (aunque es una consecuencia de esa energía mucho menos nítida que la que iba a descubrir Casimir). Pero el desarrollo de Casimir fue independiente de tal actividad. Por entonces no conocía semejante interpretación del trabajo de Lamb; su razonamiento original no vino influido por tal teoría, sino por las palabras de Bohr.

En un primer paso, haciendo uso de un método de regularización alternativo al de la *zeta* de Riemann, basado en introducir un corte en las frecuencias, Casimir logró que la energía de las fluctuaciones del vacío tuviese un valor finito, pero no consiguió dar sentido físico a tal valor. Sin otra referencia, lo que se obtiene es simplemente el origen de energías del sistema, que podemos arbitrariamente tomar como cero. Ahora bien, tras pensarlo un poco más, Casimir dio con una idea genial y sencilla a un tiempo. Propuso comparar dos situaciones: la energía de las fluctuaciones del vacío sin más y la correspondiente a las fluctuaciones del vacío en presencia de unas "condiciones de contorno", es decir, cuando el vacío está sometido a ciertos límites, donde las magnitudes físicas han de tomar valores determinados. La diferencia entre ambas energías tiene un valor intrínseco, independiente de donde hayamos colocado el origen de energías.

En concreto, Casimir consideró el caso de dos placas livianas, ideales, perfectamente conductoras y de extensión infinita (todo en aras de simplificar los cálculos) colocadas en el vacío del campo electromagnético (es decir, en ausencia de un campo ordinario, generado por algún sistema material). Todo campo, incluso en su estado vacío, ejerce una presión de radiación que es proporcional a la energía o frecuencia de los distintos modos de vibración. En una cavidad resonante, la presión de radiación es mayor en el interior que en el exterior, por cuya razón los espejos o placas tienden a separarse. Para los modos fuera de resonancia, en cambio, la presión de radiación en el interior es más baja que en el exterior y las placas experimentan una fuerza de atracción. Resultó, en el caso de las dos placas, que los modos que contribuyen a la fuerza atractiva dominan ligeramente sobre los modos resonantes que tienden a separar las placas. Por consiguiente, sumando todos los efectos, las placas tienden a juntarse. Muy pocos físicos lograron entenderlo en aquella época.

Esa fuerza es proporcional al área de las placas e inversamente proporcional a la separación entre las placas elevada a la cuarta potencia, con una constante de proporcionalidad en la que intervienen solamente constantes fundamentales, como la de Planck y la velocidad de la luz. De ahí la universalidad del fenómeno, que no depende de la naturaleza de las placas. Para hacerse una idea de las magnitudes, dos placas de 1 cm^2 de superficie situadas a una distancia de una micra se atraen con una fuerza de 0,013 dinas —unos 10^{-7} Newton, el peso de una cienmillonésima de gramo—. Mediante la fórmula resulta fácil calcular cuál es la fuerza en otras condiciones: mientras que se trata de un valor insignificante para dos placas separadas por metros de distancia, resulta una fuerza muy considerable cuando la separación es de unos pocos nanómetros, que es donde la fuerza de Casimir se convierte en la más importante que actúa entre dos cuerpos neutros. Así, a una separación de 10 nm, cien veces el tamaño de un átomo, el efecto Casimir produce el equivalente a una presión de una atmósfera.

Experimentos recientes

No resultó fácil llevar a cabo en el laboratorio el experimento. Las placas nunca tienen extensión infinita, ni son perfectamente conductoras. Intervienen efectos de temperatura, gravitatorios, de rugosidad de las superficies y otros. Para empezar, hay infinitas distancias entre dos placas paralelas. ¿Cómo determinar que son en efecto paralelas? Las primeras y variadas confirmaciones experimentales del efecto Casimir, llevadas a cabo en los laboratorios de Philips en Eindhoven por Marcus Sparnaay y otros colaboradores, diez años después de la

El mérito de Casimir estriba en haber descubierto que la energía del vacío, en determinadas circunstancias, sí tiene, pese a todo, consecuencias físicas discernibles.

El autor

Emilio Elizalde, físico y matemático, es en la actualidad profesor de investigación del CSIC en el Instituto de Ciencias del Espacio e IEEC, Barcelona. Es uno de los físicos que dieron gran relevancia a las investigaciones sobre el efecto Casimir realizadas en esta ciudad a finales de los años ochenta (con Rolf Tarrach, Enric Verdaguer, Sonia Pabàn, August Romeo, Sergio Leseduarte y Klaus Kirsten). En 2005 organizó en CosmoCaixa, Barcelona, el 7º congreso internacional QFEXT'05, sobre teorías de campos cuánticos con condiciones de contorno, en las que el efecto Casimir desempeña una función determinante. El propio Casimir había participado en el 4º de estos congresos, celebrado en Leipzig. El autor quiere dedicar este artículo al profesor Pedro Pascual de Sans, *in memoriam*.

aparición del artículo, subestimaron los diversos errores que aparecen y hoy en día nadie las considera ya verdaderas comprobaciones. Sparnaay fue cauto al limitarse a afirmar que sus resultados "no contradecían la predicción teórica de Casimir".

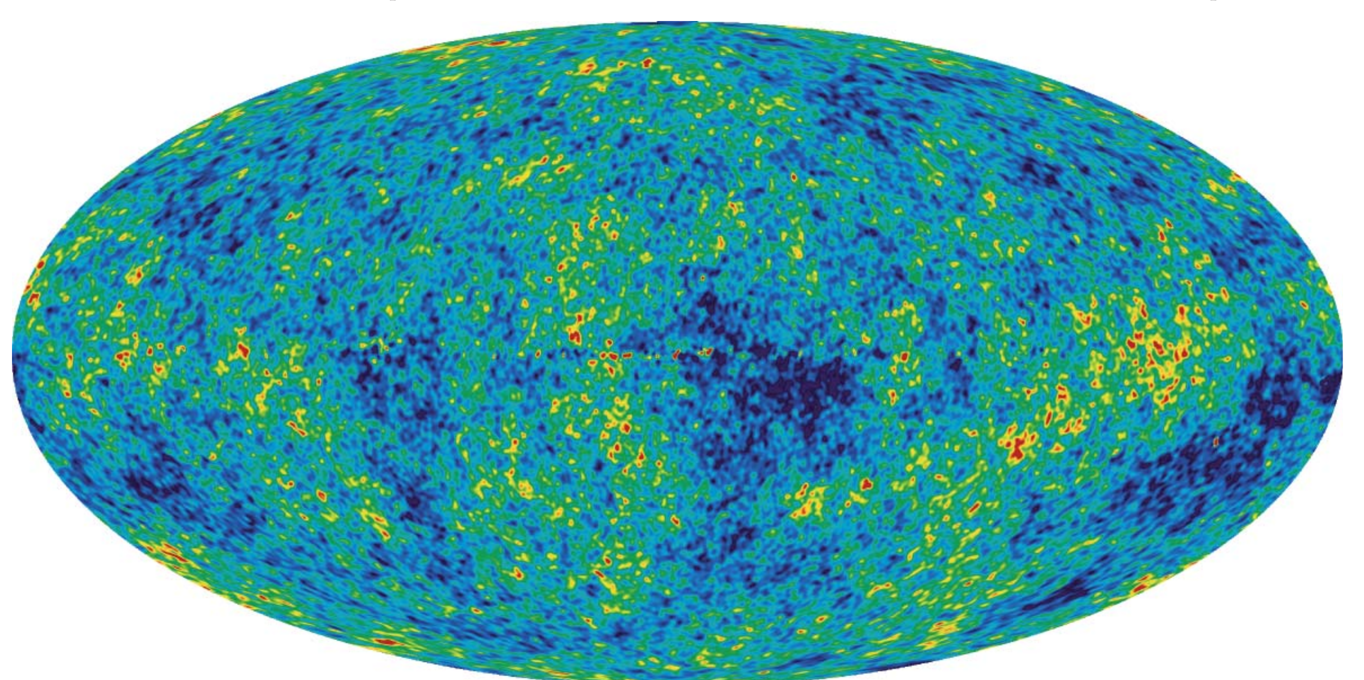
Desde entonces se ha avanzado mucho en la detección del efecto. Transcurrieron, sin embargo, 50 años desde la propuesta de Casimir hasta que, en 1997, Steven Lamoreaux, a la sazón en la Universidad de Washington en Seattle, acometiese un experimento concluyente. Midió la fuerza de Casimir entre una lente esférica de cuatro centímetros de diámetro y una placa de cuarzo óptico de dos centímetros y medio en diagonal, ambas con un recubrimiento de cobre y oro, conectadas a un péndulo de torsión en el vacío. Al acercar los dos objetos a una distancia de pocas micras, Lamoreaux observó que se atraían con la fuerza predicha. La medición efectuada con el péndulo de torsión reprodujo el resultado de Casimir para esta configuración, estimándose el error en un 5 %. El de Lamoreaux fue el punto de partida de varios experimentos aún más precisos que han rebajado el margen de error al 1 % . Ahora no cabe la menor duda de que los cálculos de Casimir eran correctos.

Merecen destacarse los experimentos de Umar Mohideen y colaboradores en la Universidad de California en Riverside. Colocaron una esfera de poliestireno de 200 micras de diámetro sobre la punta de un microscopio de fuerzas atómicas. Aproximando la esfera, recubierta de aluminio u oro, hasta una distancia de una décima de micra de un disco plano, recubierto de estos metales, observaron la atracción predicha por Casimir, monitorizándola con gran precisión mediante las desviaciones experimentadas por un rayo láser.

Thomas Ederth, del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, llevó a cabo otro experimento, también con un microscopio de fuerzas atómicas, en el que situaba dos cilindros recubiertos de oro en posiciones perpendiculares entre sí y separados por tan sólo 20 nanómetros (eso es, dos cienmillonésimas de metro). En todos estos casos se obtuvieron precisiones del 3-5 %.

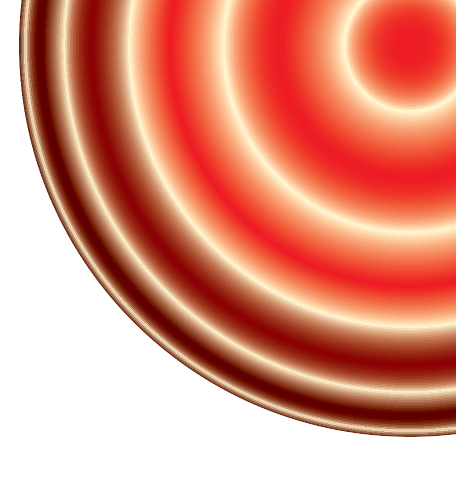
Hay que tener en cuenta que esos experimentos no se llevaron a cabo con placas paralelas, según la propuesta original de Casimir, dada la dificultad de controlar con precisión la distancia entre dos placas. Es mucho más sencillo determinar la de una superficie esférica y una placa, que queda definida por la distancia entre los puntos más próximos entre un objeto y el otro. Sin embargo, los cálculos matemáticos que hay que llevar a cabo en este caso son mucho más farragosos e introducen también un pequeño error teórico (que puede controlarse para que quede por debajo del 1 % experimental). El error del único experimento llevado a cabo con dos placas, por parte del grupo de G. Bressi, el año 2002, en la Universidad de Padua, con separaciones entre placas de entre 0,5 y 3 micras, no pudo bajarse del 15 %.

Hay otras causas de error. Que los espejos reales no sean idealmente lisos es una de ellas: las irregularidades, que llegan a los 50 nanómetros, son de la misma magnitud que la separación que hay que medir. Por otra parte, algunas frecuencias se reflejan del todo,



4. LAS FLUCTUACIONES DEL VACIO no sólo se manifiestan a pequeña escala, entre unas placas metálicas en el pequeño mundo de un laboratorio. Según los modelos inflacionarios del origen del universo, las pequeñas diferencias de temperatura que se reflejan en la radiación de fondo de microondas que baña el universo derivan de las fluctuaciones del vacío del campo que impulsó la fase de inflación —expansión exponencialmente acelerada— del universo en los primeros momentos de su existencia (las regiones más azules son las más frías en este mapa de la radiación de microondas de los cielos).

NASA/WMAP SCIENCE TEAM, FIVE YEAR MICROWAVE SKY IMAGE



otras bastante bien, otras mal y otras no son reflejadas en absoluto por los espejos reales, transparentes para frecuencias muy altas. La dependencia en la frecuencia del coeficiente de reflexión del espejo debe ser tenida en cuenta a la hora de efectuar una medición real, según apuntó ya Evgeny Lifshitz en los años cincuenta.

Y los experimentos nunca se llevan a cabo en el cero absoluto de temperatura, sino a temperatura ambiente: las fluctuaciones térmicas compiten con las propias del vacío cuántico y enmascaran el resultado. Aunque el efecto térmico resulta irrelevante para separaciones inferiores a la micra (ya que entonces la longitud de onda de la radiación térmica es superior a la distancia entre placas y no "cabe" entre ellas una onda térmica), se ha calculado que es del mismo orden que la propia fuerza de Casimir a distancias superiores a las 7 micras. El debate sobre la contribución de los efectos de temperatura a la fuerza de Casimir prosigue.

La fuerza de Casimir se manifiesta también sin necesidad de realizar experimentos específicos para detectarla. En algunos dispositivos micro y nanoelectromecánicos las fuerzas de Casimir no sólo se manifiestan a diario, sino que llegan a constituir un verdadero engorro, ya que pegan las plaquitas y ocasionan el mal funcionamiento de las nanomáquinas.

Casimir y Van der Waals

Hasta ahora hemos expuesto la interpretación "ortodoxa" del efecto, la que parte de la existencia real de las fluctuaciones del vacío cuántico y las trata como a otras fluctuaciones conocidas. Sin embargo, el propio Casimir era consciente de la posibilidad de otras interpretaciones. De entrada, la que dio en su trabajo con Polder en términos de fuerzas de Van der Waals entre las moléculas dieléctricas del material de las placas. En esencia, no hay tanta diferencia entre las dos aproximaciones, pues las fuerzas de Van der Waals vendrían a ser fuerzas efectivas residuales de interacciones más fundamentales de naturaleza cuántica (lo que en la época de Van der Waals era del todo desconocido; su fórmula tenía un carácter fenomenológico). Sin embargo, las fuerzas de Van der Waals tienen un radio de acción más pequeño que la fuerza de Casimir.

Según el propio Casimir, en el interior del metal que forma las placas hay fuerzas de cohesión, que cuando uno presiona las placas, juntándolas, comienzan a actuar. Si se empieza a separarlas, o mejor aún, si tomamos simplemente una de las placas y la partimos en dos, primero hay que vencer los enlaces químicos entre las moléculas, luego las fuerzas residuales de cohesión de Van der Waals entre los dos trozos aún muy próximos y, si hay que seguir separando los trozos todavía más, quedará una fuerza remanente, una suerte de cola de la interacción, que se resiste a desaparecer. La fuerza de Casimir sería la última, y la más elegante, de todas esas energías de cohesión.

Visto así, parecería que el signo de la fuerza de Casimir no puede ser más que atractivo. Por eso causó enorme impacto el resultado de Timothy Boyer, publicado en 1968, de que si en lugar de dos placas tuviéramos una cápsula esférica cerrada, ésta experimentaría una presión hacia afuera debida a una fuerza de Casimir de signo contrario al habitual. Pero es muy difícil llevar a cabo el experimento, ya que el resultado es topológico: dos casquetes semiesféricos se atraerán siempre y sólo cuando se tocasen cerrando una esfera debería observarse la repulsión. Además, la esfera debe ser perfecta, pues para cualquier deformación elipsoidal el resultado ya no está claro; depende del corte introducido para regularizar el valor infinito que aparece. Hay otros trabajos para el caso de pistones y otras configuraciones cerradas en que se obtienen fuerzas repulsivas bajo ciertas condiciones. Se está trabajando con diversos materiales que podrían repelerse por acción de las fluctuaciones del vacío. Y la fuerza repulsiva es crucial (a la vez que difícil de obtener) en las aplicaciones del efecto Casimir en cosmología.

¿Se ha observado realmente la energía del vacío?

La gran precisión y belleza formal de los resultados precedentes no aporta, según algunos, pruebas definitivas sobre la existencia real de la energía del vacío. Refutadas las objeciones sobre una posible confusión de la fuerza de Casimir con las fuerzas de Van der Waals entre las moléculas de las placas, han surgido otras nuevas que no tienen que ver ya con atracciones alternativas entre las placas, sino con la propia interacción de las fluctuaciones del vacío cuántico con cada una de ellas. En lo que sigue nos ceñiremos a una sola placa situada en el vacío del campo electromagnético (o de otro campo cualquiera).

El efecto Casimir se establece como diferencia entre la energía del vacío con la placa y la energía del mismo vacío sin la placa. Desde el punto de vista teórico, del cálculo, la presencia de la placa se traduce en la simple imposición de una determinada condición de contorno sobre el campo. Para simplificar el argumento, pensemos en términos de un campo escalar con una condición de contorno, la más simple posible, que consiste en imponer que dicho

Casimir consideró el caso de dos placas livianas, ideales, perfectamente conductoras y de extensión infinita (todo en aras de simplificar los cálculos) colocadas en el vacío del campo electromagnético

HENDRIK CASIMIR



EN 1979, Casimir fue uno de los conferenciantes principales en la celebración del 25 aniversario del CERN, el Centro Europeo de Investigación Nuclear.

Hendrik Brugt Gerhard Casimir nació en La Haya el 15 de julio de 1909. Casimir estuvo un tiempo en Copenhague, con Niels Bohr. Cuenta en su autobiografía la anécdota de que, a fin de convencer a sus padres en Holanda de que Bohr era una persona importante, les dijo que al escribirle a Dinamarca bastaba con que pusieran en el sobre "Hendrik Casimir c/o Niels Bohr", sin más dirección o seña. Así lo hicieron y la carta llegó puntualmente desde Holanda a manos de Casimir, y en muy pocos días. Tal era la influencia de los físicos en aquella época. Tras doctorarse, Casimir trabajó como asistente de Wolfgang Pauli en Zúrich. Y en 1938 se convirtió en profesor de física de la Universidad de Leiden. En 1942 se trasladó a los Laboratorios de Investigación de la empresa Philips en Eindhoven. Allí siguió ejerciendo como científico activo y en 1945 escribió un trabajo que se hizo famoso sobre el principio de Onsager de la reversibilidad microscópica. En 1946 se convirtió en codirector de los Laboratorios de Investigación de Philips y en miembro de su cuerpo de directores en 1956. Falleció el 4 de marzo de 2000.

FAX 343 280 6393

Prof. Dr. Emilio Elizalde
IEEC Research Division

Dear Doctor Elizalde

The conference on Frontiers of Science and Medicine originally planned by the Unesco Venice Office to be held at Barcelona 21-23 Sept. 1998 was postponed.
To the best of my knowledge a new date has not been fixed
In any case I shall probably not take part. My movements are increasingly impaired and my talk at Leipzig may turn out to have been my last appearance in public

My book is completely sold out, but I shall mail you a photo-copy

Best wishes for 1999
Sincerely
HBG Casimir

CARTA MANUSCRITA DE CASIMIR, donde responde a una invitación que le había cursado para visitar el Instituto ICE/IEEC, en Barcelona, en 1999. Por desgracia, la visita ya no pudo tener lugar. Casimir afirma en la carta que una conferencia que había impartido en Leipzig quizás iba a ser su última aparición en público.

Resulta curioso que en su autobiografía Casimir apenas haga referencia al efecto que lleva su nombre. Se limita a decir que el fenómeno "es mencionado a veces con el nombre de efecto Casimir", que su existencia "se ha comprobado experimentalmente" y que "sus generalizaciones han resultado tener cierta importancia teórica". En 1951, hallándose con Pauli participando en una conferencia en Heidelberg, trató de hacerle entender a éste la realidad de dicho efecto. Pauli no dejaba de plantearle objeción tras objeción, hasta que, por fin, viendo que Casimir seguía empecinado en sus argumentos, Pauli le llamó, y por varias veces, *Stehaufmanderl*, acepción fuerte de terco o cabezota en el alemán de Suiza y que literalmente significa tentetieso. Baste esa anécdota para poner de manifiesto que no resulta nada sencillo comprender el efecto Casimir.

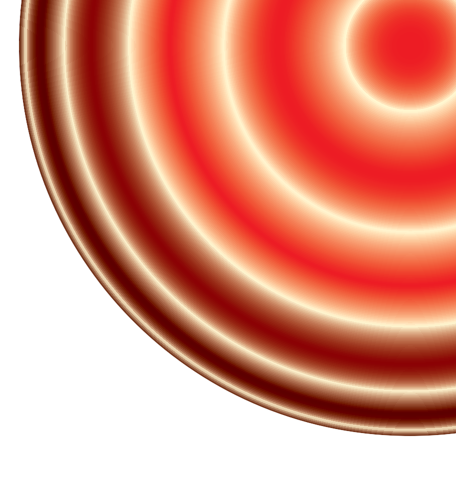
campo se anule sobre todos los puntos del espacio donde está la placa.

Obsérvese la diferencia entre teoría (modelo) y experimento (realidad material). Un campo escalar es una simple función, $\varphi(x)$, que toma un valor numérico en cada punto (un campo de números, como una sopa de números: en cada punto del plato tenemos un número). Imponer que se anule sobre una superficie (la de la placa), se hace fácilmente: basta escribir que $\varphi(s) = 0$, para todo punto s de la superficie. El cálculo subsiguiente de energías es también sencillo: se calcula la diferencia y se obtiene la perturbación de la energía del vacío producida por la placa. Aquí el vacío permanece inalterado, pues nos hemos limitado a imponer una simple condición de contorno sobre el campo. Y ahora viene la objeción, debida a Robert Jaffe y colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Desde el punto de vista de la teoría de campos cuánticos, la única manera de lograr en la realidad experimental que el campo φ se anule sobre una superficie S es por imposición sobre dicha superficie de otro campo que aniquile todos los modos del primero, correspondientes a sus infinitas frecuencias. Planteado así, resulta imposible: sólo conseguiremos anular frecuencias hasta un cierto valor. Hasta aquí ello sólo significa que cometeremos un error que habrá que tener en cuenta en el resultado final. Pero queda la segunda y demoledora objeción: al introducir un nuevo campo para aniquilar los modos de φ sobre S, estamos perturbando el vacío correspondiente a φ.

Esta objeción cuestiona que los experimentos de las fuerzas de Casimir pongan de manifiesto las fluctuaciones de la energía del vacío cuántico. No se afirma que la energía del vacío no exista; se limita a declarar que los experimentos llevados a cabo hasta la fecha son inadecuados para ponerlas de manifiesto. De hecho, el grupo dirigido por Jaffe ha presentado numerosos trabajos sobre el cálculo del efecto Casimir en muy diversas configuraciones y usando métodos e ideas que han revolucionado la disciplina. Mención especial merecen también las investigaciones anteriores de la escuela rusa de San Petersburgo, las del grupo de Schwinger con sus alumnos Boyer y Milton en EE.UU., las de Barton y colaboradores en el Reino Unido, y muchos más.

Por mor de la exhaustividad deberíamos mencionar algunas escuelas alternativas, en particular la que se originó en torno a Asim O. Barut, que propugnan la no necesidad de la "segunda cuantización" (la de los campos, en este caso el electromagnético, siendo la primera la de las partículas) y, de ahí, la no existencia



de fluctuaciones del estado vacío, lo que sustituyen por una electrodinámica no lineal.

El efecto Casimir dinámico

Efectos de tipo Casimir pero con ingredientes adicionales aparecen también cuando se imponen al sistema condiciones de contorno dinámicas, como es el caso de espejos que vibran o de campos gravitacionales (u otros campos de fondo) que varían con el tiempo. Así, el desplazamiento repentino de una placa reflectante no es comunicado a un punto del vacío del campo situado a una distancia *r* de la placa hasta que transcurre un tiempo *r*/*c* (*c*, velocidad de la luz) y cálculos precisos muestran que se crea una radiación de fotones.

El "efecto Casimir dinámico" fue propuesto por Stephen Fulling y Paul Davies en 1976. Otro efecto de vacío de aproximadamente la misma época es el efecto Unruh-Davies: un detector o átomo desplazándose con aceleración uniforme, *a*, en el vacío respondería del mismo modo que si se hallase en reposo, pero con un baño térmico a una cierta temperatura, denominada "temperatura de Unruh", proporcional a la aceleración *a*. En este efecto, las fluctuaciones del vacío cuántico se transforman en fluctuaciones térmicas; una temperatura de un picokelvin (10^{-12} grados) corresponde a una aceleración de $2{,}5\ 10^{-8}$m/s^2. La detección de este efecto queda fuera del alcance de la técnica actual.

En la proposición original de Davies y Fulling del efecto Casimir dinámico las placas son de nuevo, como en el efecto Casimir ordinario, espejos perfectos; reflejan todas las longitudes de onda incidentes. Aquí, una manifestación adicional de las fluctuaciones del vacío cuántico es la creación de fotones reales, una radiación real emitida por dicho vacío. Aunque este efecto es, como en el caso del efecto Unruh-Davies, muy difícil de medir experimentalmente, Roberto Onofrio y colaboradores, del Colegio Dartmouth, expusieron no hace mucho el diseño de un experimento a llevar a cabo en su laboratorio, que involucraría una amplificación atómica de la señal en 8 o 9 órdenes de magnitud.

Desde el trabajo de Fulling y Davies, numerosos grupos se han ocupado del efecto Casimir dinámico, cuya formulación teórica entrañaba una dificultad notable: el principio fundamental de conservación de la energía no se cumplía durante todo el proceso, aunque sí cuadraba el balance final de energías. La dificultad provenía del tratamiento de los infinitos con la consiguiente renormalización que hay que llevar a cabo. En un trabajo realizado en colaboración con Jaume Haro, de la Universidad Politécnica de Cataluña, publicado en septiembre de 2006, hemos conseguido resolver este problema.

Para probar la teoría, consideramos espejos parcialmente transmisores, transparentes a frecuencias muy elevadas, de manera que la transición del régimen de reflexión al de transparencia fuese infinitamente suave. Así hemos construido una formulación físicamente consistente del efecto Casimir dinámico, una teoría en que los espejos satisfacen condiciones mucho más ajustadas a la realidad.

Casimir y la energía oscura

Desde 1998 se sabe que la expansión del universo se acelera. ¿A qué se debe esta aceleración? Einstein introdujo en sus ecuaciones de la relatividad general un término, la constante cosmológica, para que entre las soluciones estuviese la correspondiente a un universo estacionario. Sin embargo, la constante cosmológica puede también hacer las veces de una fuerza repulsiva que acelere la expansión del universo. En 1968, Zeldovich relacionó la energía de punto cero y la constante cosmológica. Pero la densidad de energía del vacío a escala cosmológica da un valor demasiado grande, 120 órdenes de magnitud superior al deseado para explicar la expansión acelerada. Es la mayor discrepancia en toda la historia de la física: el problema de la constante cosmológica. Para resolverlo, se ha usado todo tipo de argumentos: supersimetría, agujeros de gusano, teoría de cuerdas, compactificaciones y extensiones analíticas diversas. Las explicaciones más plausibles utilizan el *principio antrópico*, lo que a algunos gusta poco.

En nuestro grupo estamos trabajando en dos modelos distintos para explicar esa "energía oscura". Uno es el ya mencionado de constante cosmológica, en el que ésta recibe las contribuciones de las fluctuaciones del vacío cuántico a escala cósmica. Con el signo adecuado podría llegar a explicar la aceleración observada pues, si se consigue resolver la parte *estándar* del problema —la correspondiente a una curvatura nula del universo—, el pequeño valor de la aceleración podría tal vez obtenerse de un efecto Casimir a nivel cosmológico, donde las *placas* serían ahora la curvatura o topología del propio espaciotiempo y la diferencia de energías se establece para los casos con curvatura no nula y curvatura nula. El efecto repulsivo (difícil de obtener) se logra en algunos modelos supersimétricos. La investigación continúa y nos mantendrá ocupados durante los próximos años. De estar en lo cierto, las fluctuaciones del vacío cuántico, tan magistralmente interpretadas por Casimir, podrían ser lo que propulsa a nuestro universo en su expansión acelerada.

Bibliografía complementaria

ESSENTIALS OF THE CASIMIR EFFECT AND ITS COMPUTATION. E. Elizalde y A. Romeo en *American Journal of Physics*, vol. 59, pág. 711; 1991.

THE QUANTUM VACUUM: AN INTRODUCTION TO QUANTUM ELECTRODYNAMICS. Peter W. Milonni. Academic Press; Boston, 1994.

THE CASIMIR EFFECT: PHYSICAL MANIFESTATIONS OF ZERO-POINT ENERGY. K. A. Milton. World Scientific; Singapore, 2001.

NEW DEVELOPMENTS IN THE CASIMIR EFFECT. M. Bordag, U. Mohideen y V. M. Mostepanenko en *Physics Report*, vol. 353, n.º 1-3, págs. 1-205; Elsevier, 2001.

PROCEEDINGS QFEXT'05. Editado por E. Elizalde, S. D. Odintsov en *Journal of Physics A*, vol. 39, n.º 21; mayo, 2006.

HAMILTONIAN APPROACH TO THE DYNAMICAL CASIMIR EFFECT. J. Haro y E. Elizalde en *Physical Review Letters*, vol. 97, pág. 130401; 2006.

MEASURED LONG-RANGE REPULSIVE CASIMIR-LIFSCHITZ FORCES. J. N. Munday, F. Capasso y V. A. Parsegian en *Nature*, vol. 457, pág. 170; 2009.

Origen y evol de los murcié

El registro fósil y el análisis genético arrojan luz sobre la evolución de los murciélagos y zanjan un antiguo debate sobre los orígenes del vuelo y la ecolocación

NANCY B. SIMMONS

CONCEPTOS BASICOS

- Los murciélagos son los únicos mamíferos que vuelan. ¿Cómo evolucionaron a partir de antepasados terrestres?
- Hasta hace poco, todos los murciélagos fósiles conocidos, incluso los más antiguos, guardaban una estrecha semejanza con los murciélagos modernos. Nuevos fósiles han revelado una especie que conecta a los Quirópteros con sus antepasados terrestres.
- Hallazgos en el campo de la genética y de la biología del desarrollo han iluminado todavía más los orígenes de los murciélagos; han dilucidado su lugar en el árbol genealógico de los Mamíferos y la evolución del ala de los Quirópteros.

Si el lector escudriña el cielo crepuscular en un atardecer de verano, podrá observar uno de los éxitos más espectaculares de la evolución: los murciélagos. Con representantes en todos los continentes, salvo en la Antártida, los Quirópteros presentan una diversidad extraordinaria. Suponen una de cada cinco especies de mamíferos actuales.

La clave del auge de los murciélagos estriba, desde luego, en su capacidad de volar, pues les permite explotar recursos a los que otros mamíferos no pueden acceder. Pero su ascenso no era en absoluto una conclusión inevitable; ningún otro mamífero ha conquistado el aire. De hecho, el modo en que estos reyes del cielo nocturno surgieron de antepasados terrestres es un interrogante que ha venido cautivando a los biólogos durante decenios.

Las respuestas han llegado con parsimonia. Sin embargo, en febrero de 2008, la autora y sus colaboradores descubrieron dos fósiles de una nueva especie de murciélago que arroja luz sobre tan misteriosa transformación. Procedente de Wyoming, la especie aludida (*Onychonycteris finneyi*) corresponde al murciélago más primitivo descubierto hasta la fecha. Estos y otros fósiles, junto con los resultados de análisis genéticos recientes, han llevado a una nueva comprensión del origen y la evolución de los Quirópteros.

Maravilla alada

Para apreciar lo distintivo de los murciélagos, considere el lector uno de sus rasgos característicos: las alas. Algunos mamíferos, como las ardillas voladoras, planean de árbol en árbol, gracias a un halda de piel que conecta sus patas anteriores y posteriores. De hecho, los expertos suelen estar de acuerdo en que los murciélagos evolucionaron a partir de un antepasado arborícola y planeador. Sin embargo, los murciélagos son los únicos mamíferos capacitados para llevar a cabo un vuelo activo (propulsado), una acción mucho más complicada que el planeo. Deben esta capacidad a la estructura de sus alas.

Los huesos del ala de un murciélago están constituidos por el antebrazo y los huesos alargados de los dedos, que sostienen y extienden las membranas de las alas, delgadas y elásticas. Las membranas se extienden hacia atrás para incluir las patas posteriores, que son bastante más pequeñas que las de un mamífero terrestre de tamaño corporal equiparable. Asimismo,

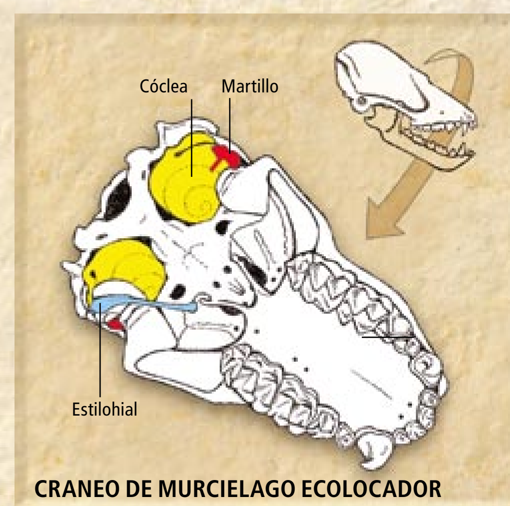
1. VICTORIA ALADA: Los murciélagos dominan el cielo nocturno, gracias a su capacidad de vuelo.

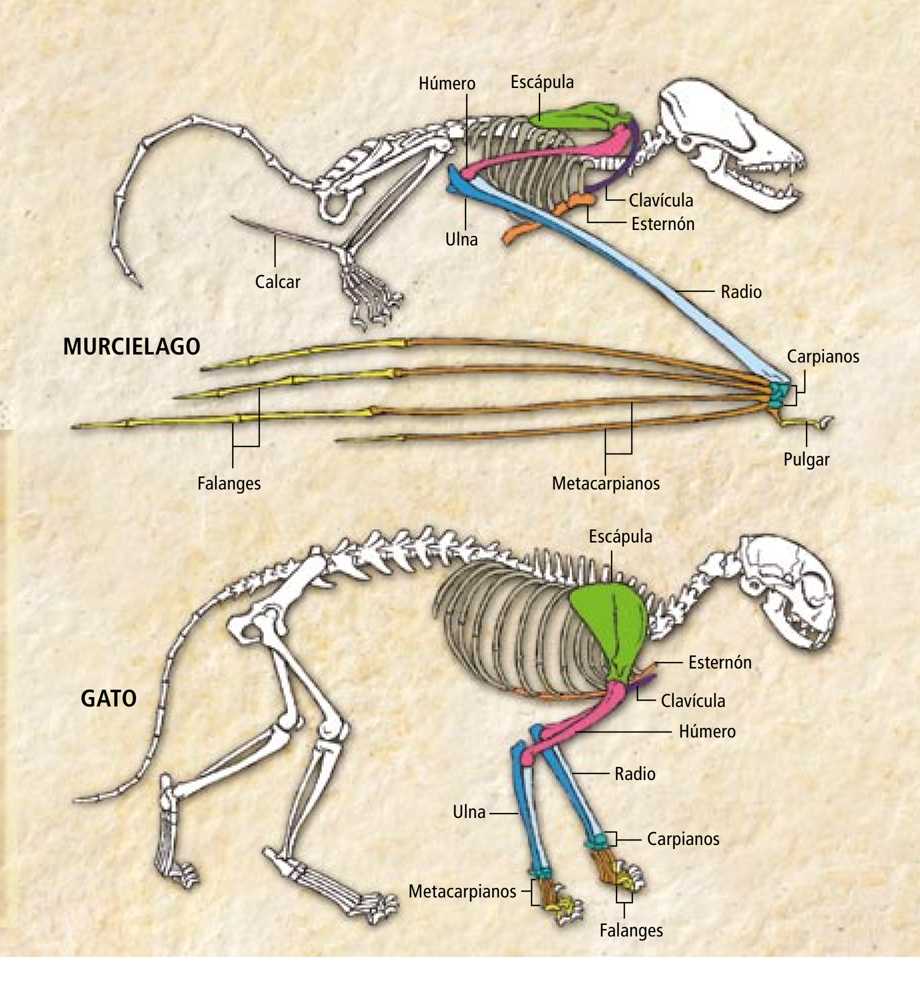
KIM TAYLOR *NPL/Minden Pictures*


ución
lagos

Anatomía del vuelo y la ecolocación

La aparición de los Quirópteros a partir de mamíferos terrestres constituye una de las mayores transformaciones de la evolución. La mayoría de las modificaciones del esqueleto de un murciélago guardan relación con el vuelo (*huesos coloreados*). Se modificaron también tres huesos de la garganta y el oído: el estilohial, el martillo y la cóclea; se engrosaron y, con ello, posibilitaron la evolución de la ecolocación (*detalle*).





PATRICIA J. WYNNE (*esqueletos*)

muchos murciélagos poseen entre sus patas posteriores una membrana caudal. Un hueso único, el calcar, surge del talón para sostener el borde posterior de dicha membrana. Al mover dedos, brazos, piernas y calcares, los murciélagos maniobran sus alas de maneras innumerables, lo que los convierte en magníficos voladores.

La mayoría de los murciélagos muestran capacidad de ecolocación (localización a partir del eco). Mediante la producción de sonidos agudos y el posterior análisis de los ecos que retornan, estos animales nocturnos detectan obstáculos y presas con mayor eficacia que si utilizaran sólo la visión. Más del 85 por ciento de las especies actuales de murciélagos utilizan la ecolocación para navegar. El resto pertenece a la familia de los Pteropódidos, murciélagos frugívoros del Viejo Mundo. Llamados también zorros voladores, parece que perdieron esta capacidad; se basan sólo en la vista y el olfato para encontrar los frutos y las flores de los que se alimentan.

Los murciélagos con capacidad de ecolocación poseen unas características anatómicas, neurológicas y de comportamiento que les permiten enviar y recibir sonidos de frecuencia elevada. Tres huesos del cráneo han experimentado modificación. El primero es el estilohial, un hueso largo y delgado que conecta la base del cráneo con una serie de huesos pequeños (aparato hioides) que sostienen los músculos de la garganta y la laringe. En la mayoría de los murciélagos ecolocadores, el extremo superior del estilohial se halla expandido en una suerte de paleta, que ayuda a anclar el aparato hioides en el cráneo.

Los otros dos huesos que llevan la rúbrica de la ecolocación residen en el oído. Todos los mamíferos perciben el sonido mediante una cadena de huesos, los huesecillos u osículos auditivos, que transmiten el sonido entre el tímpano y el oído interno, lleno de líquido. El martillo es el primer hueso de la cadena; en los murciélagos con capacidad de ecolocación posee una extensión amplia y bulbosa, que facilita el control de su vibración. Después de atravesar los huesecillos auditivos, los sonidos cursan hasta el oído interno, donde impactan sobre la cóclea, o caracol, una estructura arrollada y llena de líquido que alberga neuronas especializadas en la percepción sonora. En comparación con otros mamíferos, los murciélagos ecolocadores poseen una cóclea mayor que otras estructuras craneales; merced a esa estructura, detectan sonidos de frecuencia elevada y discriminan entre las distintas frecuencias de los sonidos percibidos.

¿Qué fue primero?

La revelación, hace más de 60 años, de que la mayoría de los murciélagos podían “ver con el sonido”, dejó claro que la ecolocación había contribuido al éxito evolutivo y a la di-

versidad de los Quirópteros. Pero, ¿cuál de las dos adaptaciones clave (vuelo y ecolocación) advino primero? ¿Cómo y por qué surgieron por evolución? Hacia el decenio de 1990 había tres teorías sobre el tema en liza.

Según la hipótesis que postulaba la anterioridad del vuelo, los antepasados de los murciélagos habían desarrollado un vuelo potente, con el objetivo de mejorar la movilidad y de reducir el tiempo y la energía necesarios para alimentarse. Posteriormente, evolucionó la ecolocación, para facilitar a los primeros murciélagos la detección y la persecución de las presas que ya cazaban en vuelo.

El modelo de la anterioridad de la ecolocación propone, en cambio, que los protomurciélagos eran planeadores; cazaban presas en el aire, desde sus posaderos en los árboles, mediante la ecolocación, que evolucionó para facilitar la detección de presas a mayor distancia. Después evolucionó el vuelo batido, para aumentar la movilidad y simplificar el retorno al posadero de caza.

La hipótesis tercera, del desarrollo en tándem, sugiere que el vuelo y la ecolocación evolucionaron a la par, propuesta que se basa en pruebas experimentales que muestran que a los murciélagos les resulta energéticamente muy costoso producir llamadas de ecolocación cuando se hallan inmóviles. Sin embargo, durante el vuelo el coste resulta casi despreciable, porque la contracción de los músculos del vuelo ayuda a bombear los pulmones, generando así el flujo de aire necesario para la producción de sonidos de intensidad y frecuencia elevadas.

La única manera de comprobar las hipótesis citadas sobre los orígenes del vuelo y de la ecolocación es cartografiar la distribución de los caracteres pertinentes (alas y cócleas engrosadas) en un árbol genealógico de los murciélagos, para determinar en qué punto aparecieron por evolución. Sin embargo, en el decenio de los noventa del siglo pasado carecíamos de algún tipo de quiróptero fósil que tuviera alguno de esos rasgos distintivos y no los otros.

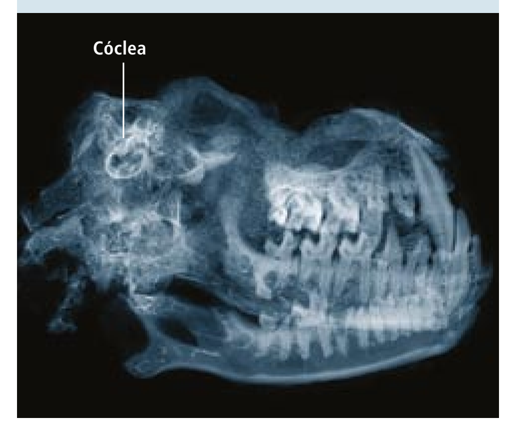
Los fósiles de murciélagos son rarísimos. Los murciélagos antiguos, como sus parientes modernos, eran pequeños y frágiles; solían vivir en hábitats tropicales, donde la descomposición procede con rapidez. Para que un quiróptero se fosilice debe morir en un lugar donde el sedimento lo cubra pronto y lo proteja de carroñeros y microorganismos.

Hasta hace poco, el quiróptero más antiguo y primitivo que se conocía era *Icaronycteris index*, de 52,5 millones de años de antigüedad. (Debe su nombre a Icaro, el personaje de la mitología griega que voló demasiado cerca del Sol.) *Icaronycteris* se descubrió en el decenio de los sesenta en depósitos lacustres de la Formación Green River, de Wyoming, cuyas rocas de grano fino, esquistos y areniscas, han proporcionado peces, plantas, mamíferos, insectos, cocodrilos y aves, en perfecto estado de conservación.

Durante los cuatro decenios posteriores, *Icaronycteris* formó la base para comprender la fase más temprana de la evolución de los Quirópteros. Sin embargo, lo reseñable de *Icaronycteris* era quizá la estrecha semejanza del fósil con los murciélagos actuales. La forma de sus dientes indicaba que comía insectos, lo mismo que la mayoría de los murciélagos de hoy. Las proporciones de sus extremidades eran también modernas: dedos largos y delgados, antebrazos alargados y extremidades posteriores diminutas. Las escápulas (omóplatos), esternón y caja torácica atestiguaban, asimismo, una capacidad de vuelo desarrollada. Y poseía la anatomía necesaria para la ecolocación.

Si viviera en la actualidad, sería difícil distinguir *Icaronycteris* del resto de los murciélagos. Su carácter más distintivo corresponde a una pequeña garra en el dedo índice (de ahí el epíteto de especie, *index*). La mayoría de los murciélagos conservan una garra sólo en el pulgar. Con el tiempo, las puntas de los otros cuatro dedos se redujeron a bastoncillos largos y flexibles o protuberancias, embutidos del todo en la membrana alar. La garra del índice

2. ASPECTO INTERNO del cráneo del murciélago fósil *Hassianycteris*, tal como revela una radiografía de alta resolución. Muestra una cóclea (hueso del oído) engrosada, lo que indica que el animal tenía capacidad de ecolocación. Los expertos se preguntaban desde hacía tiempo si los murciélagos desarrollaron la ecolocación antes o después del vuelo. Al igual que *Hassianycteris*, todos los quirópteros fósiles conocidos antes de 2008 presentaban señales de poseer ambas capacidades.



CORTESIA DE JÖRG HABERSETZER *Instituto Senkenberg de Investigación (rayos X)*

La autora

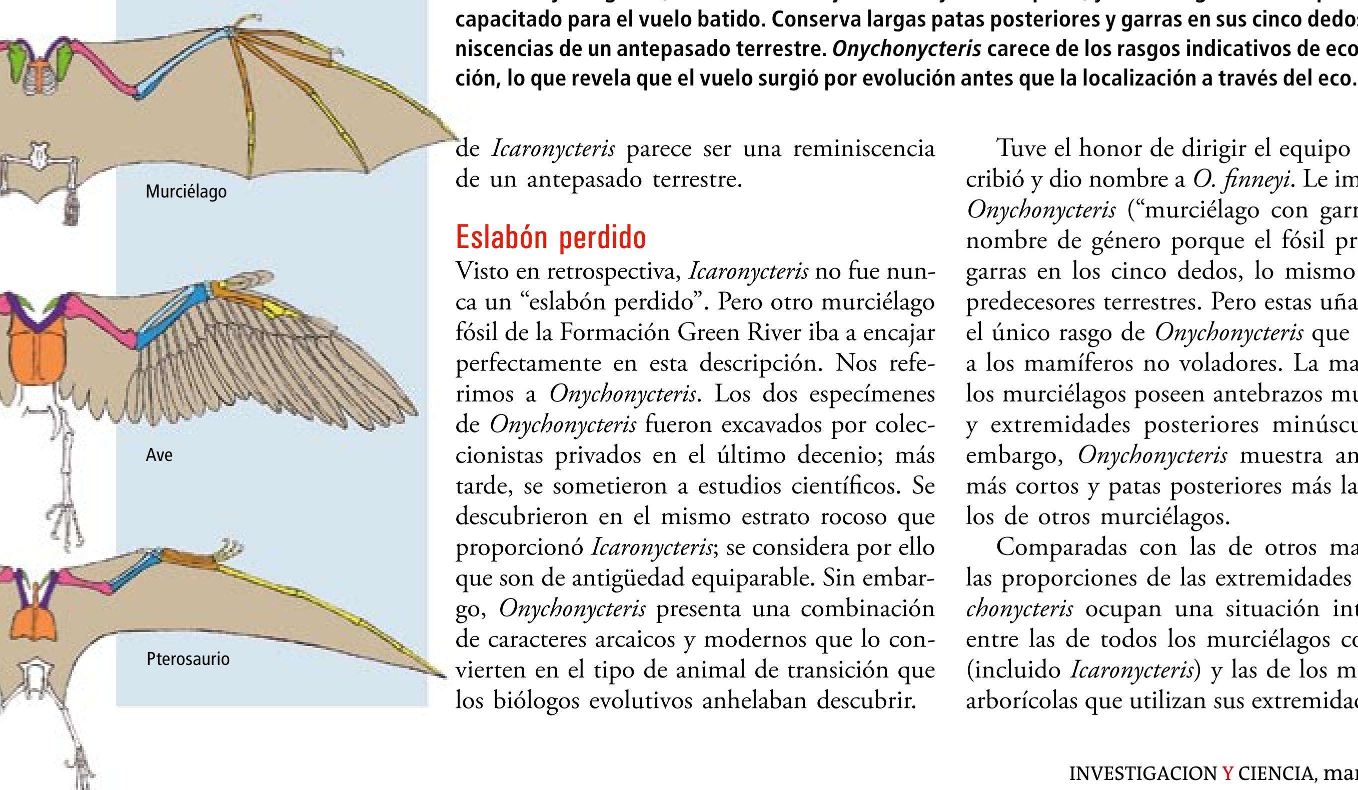
Nancy B. Simmons dirige la división de zoología de vertebrados y es conservadora del departamento de mastozoología del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York. Centra su investigación en la evolución y diversidad de los Quirópteros, incluso desde su base genética. Se ha especializado en la anatomía de murciélagos fósiles y actuales; ha realizado un intenso trabajo de campo en las pluviselvas de Sudamérica.

3. ESLABON PERDIDO: descubierto en fecha reciente, *Onychonycteris finneyi* es el murciélago más primitivo que se conoce; salva la laguna entre los murciélagos modernos y los mamíferos terrestres. Dedos muy alargados, la forma de la caja torácica y del omóplato, y otros rasgos indican que estaba capacitado para el vuelo batido. Conserva largas patas posteriores y garras en sus cinco dedos, reminiscencias de un antepasado terrestre. *Onychonycteris* carece de los rasgos indicativos de ecolocación, lo que revela que el vuelo surgió por evolución antes que la localización a través del eco.

CORTESIA DEL MUSEO AMERICANO DE HISTORIA NATURAL Y ANIKA HEBS *Instituto Senkenberg de Investigación (fósil)*; PATRICIA J. WYNNE (*alas*)

VOLADORES

Entre los vertebrados, el vuelo ha evolucionado de forma independiente en tres linajes: Quirópteros, Aves y Pterosaurios. Aunque semejantes en superficie, las alas de estos animales son distintas desde el punto de vista estructural. En los murciélagos, el antebrazo y los dedos segundo a quinto, todos alargados, forman el andamiaje primario del ala. El ala de las Aves, en cambio, se sostiene sobre todo por los huesos del antebrazo y la mano. El ala de los Pterosaurios descansaba en los huesos de la mano y el cuarto dedo.



de *Icaronycteris* parece ser una reminiscencia de un antepasado terrestre.

Eslabón perdido

Visto en retrospectiva, *Icaronycteris* no fue nunca un "eslabón perdido". Pero otro murciélago fósil de la Formación Green River iba a encajar perfectamente en esta descripción. Nos referimos a *Onychonycteris*. Los dos especímenes de *Onychonycteris* fueron excavados por coleccionistas privados en el último decenio; más tarde, se sometieron a estudios científicos. Se descubrieron en el mismo estrato rocoso que proporcionó *Icaronycteris*; se considera por ello que son de antigüedad equiparable. Sin embargo, *Onychonycteris* presenta una combinación de caracteres arcaicos y modernos que lo convierten en el tipo de animal de transición que los biólogos evolutivos anhelaban descubrir.

Tuve el honor de dirigir el equipo que describió y dio nombre a *O. finneyi*. Le impusimos *Onychonycteris* ("murciélago con garras") por nombre de género porque el fósil presentaba garras en los cinco dedos, lo mismo que sus predecesores terrestres. Pero estas uñas no son el único rasgo de *Onychonycteris* que recuerda a los mamíferos no voladores. La mayoría de los murciélagos poseen antebrazos muy largos y extremidades posteriores minúsculas. Sin embargo, *Onychonycteris* muestra antebrazos más cortos y patas posteriores más largas que los de otros murciélagos.

Comparadas con las de otros mamíferos, las proporciones de las extremidades de *Onychonycteris* ocupan una situación intermedia entre las de todos los murciélagos conocidos (incluido *Icaronycteris*) y las de los mamíferos arborícolas que utilizan sus extremidades ante-

riores para la locomoción, como los perezosos y los gibones, que se cuelgan de las ramas gran parte del tiempo que dedican a trepar por los árboles. Quizá los murciélagos evolucionaron a partir de antepasados arborícolas que empleaban una forma similar de locomoción.

A pesar de esos caracteres primitivos en las patas, otros rasgos anatómicos indican que *Onychonycteris* estaba capacitado para el vuelo batido. Sus largos dedos habrían sostenido membranas alares; las clavículas, robustas, permitían fijar al cuerpo las extremidades anteriores. Al propio tiempo, una caja torácica ancha y un esternón en quilla habrían sostenido músculos de vuelo poderosos; una escápula facetada habría facilitado la fijación de otros músculos especializados, relacionados con el vuelo.

Las proporciones de los huesos del brazo y los dedos de *Onychonycteris* ofrecen pruebas adicionales acerca de su sistema de locomoción: revelan que las alas del animal tenían una proporción de aspecto (relación entre dimensiones) muy baja y puntas pequeñas. Entre los quirópteros actuales, sólo los murciélagos de cola de ratón (Rinopomátidos) poseen alas cortas y anchas. Estos animales tienen un estilo de vuelo insólito, de planeo y revoloteo, que implica breves planeos entre períodos de vuelo batido. Creemos que *Onychonycteris* volaba de la misma manera. Quizás el vuelo de planeo y revoloteo fue el modo transicional de locomoción entre el planeo de los antepasados premurciélagos y el vuelo batido continuo de los murciélagos modernos.

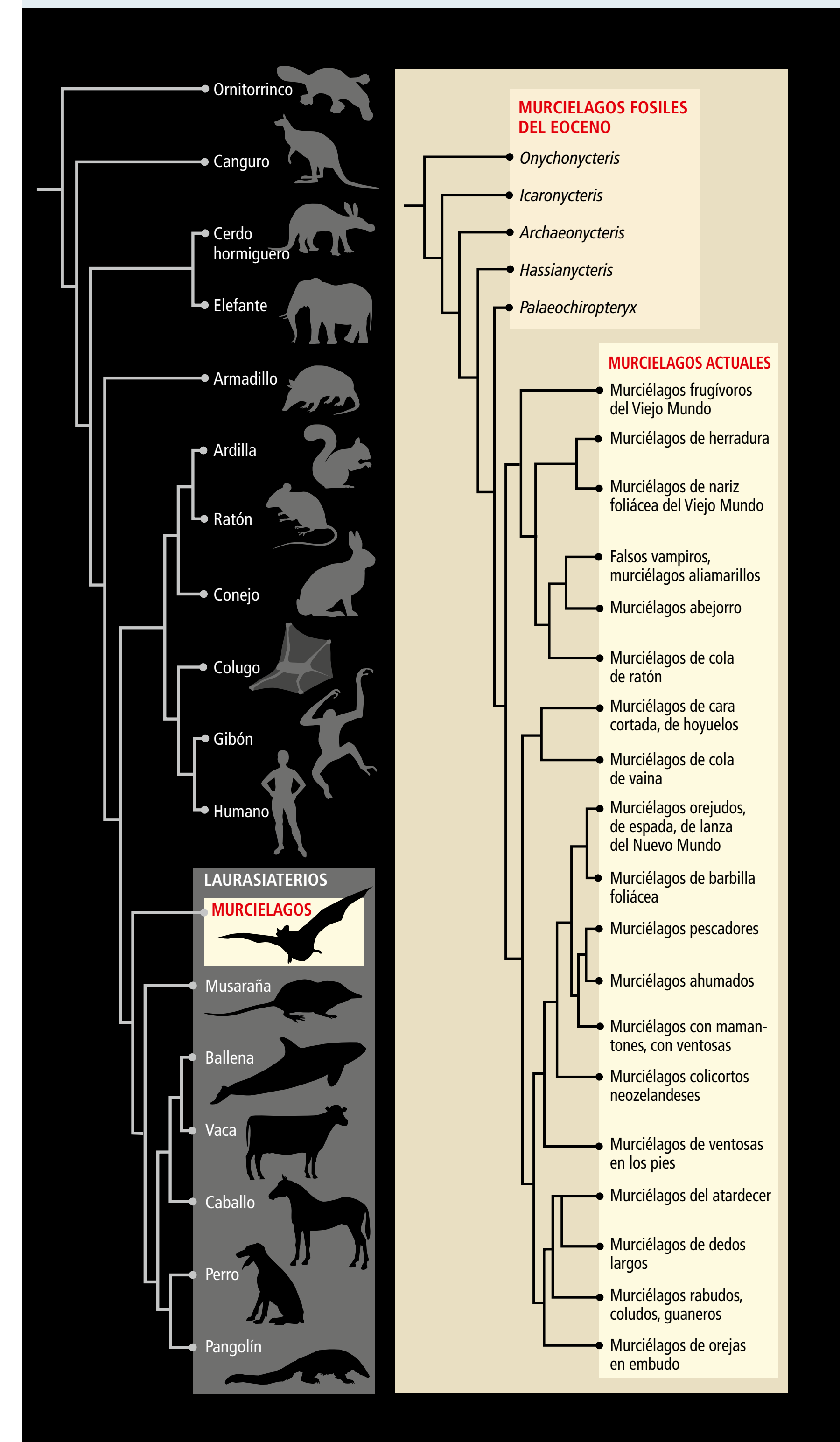
Además de esclarecer el modo en que volaban los murciélagos primitivos, *Onychonycteris* ha arrojado nueva luz en el debate acerca del origen del vuelo y la ecolocación. A diferencia de los otros murciélagos conocidos que se remontan al Eoceno (época que abarca desde hace 55,8 millones de años hasta hace 33,5 millones de años), *Onychonycteris* parece que carecía de los tres correlatos óseos de la ecolocación. Posee una cóclea pequeña y una protuberancia del martillo reducida; su estilohial carece de un extremo expandido. Pero existen rasgos de sus extremidades y torso que revelan capacidad para volar. Por tanto, parece que *Onychonycteris* representa una fase de la evolución temprana de los Quirópteros, después de que éstos hubieran logrado el vuelo, pero antes de que surgiera la ecolocación. Por fin, los fósiles nos han dado una respuesta: primero el vuelo, después la ecolocación.

Diversidad arcaica

La adquisición del vuelo y la ecolocación preparó el terreno para una fulgurante radiación adaptativa de los Quirópteros. Períodos

Filogenia de los murciélagos

Los biólogos pensaban que los Quirópteros estaban relacionados con el grupo de micromamíferos insectívoros que incluye las musarañas y sus parientes, o con los primates y sus afines, entre ellos los caguanes o colugos. Pero análisis genéticos recientes han puesto de manifiesto que los murciélagos pertenecen al grupo de los Laurasiaterios (*caja gris*), que incluye animales actuales como perros, ballenas, vacas y algunos insectívoros. (Aunque las musarañas son miembros de este grupo, los murciélagos no están más cerca de ellas que de otros representantes actuales.) Los parientes más cercanos de los murciélagos quizá sean laurasiaterios cuyos linajes se han extinguido. Para descubrirlo, los investigadores necesitan encontrar fósiles más próximos al origen de los murciélagos que *Onychonycteris*.



JEN CHRISTIANSEN

Variación ahora y entonces

Los murciélagos actuales constituyen un conjunto heterogéneo: difieren muchísimo en tamaño corporal, forma de las alas, del cráneo y dentición. Estas diferencias morfológicas reflejan dietas divergentes y la naturaleza del ambiente donde viven.

LOS MURCIELAGOS INSECTIVOROS, representados aquí por *Eptesicus fuscus*, el gran murciélago pardo americano, tienen el hocico largo y dientes con cúspides aguzadas que se entrelazan, para perforar y cortar las presas. Con alas moderadamente largas y anchas, son buenos y ágiles voladores.

***VAMPYRUM SPECTRUM*, el falso vampiro, y otros murciélagos carnívoros son mayores que sus primos insectívoros, aunque sus dientes son similares. La mayoría posee alas cortas y anchas, buenas para maniobrar cerca de obstáculos mientras cazan. Como todos los depredadores culminales, los murciélagos carnívoros, aunque se hallan ampliamente distribuidos, escasean.**



LOS MURCIELAGOS FRUGIVOROS, como *Ectophylla alba*, el murciélago blanco, suelen tener el rostro corto y molares más simples que sus primos insectívoros y carnívoros, pero conservan caninos grandes para sujetar los frutos. De cuerpo pequeño con alas cortas y anchas, *Ectophylla* se especializa en la búsqueda de pequeños frutos bajo el dosel del bosque. Disimula su color pálido cuando reposa en tiendas de hojas que construye con sus dientes frontales.

LOS VAMPIROS O MORDEDORES, como este *Desmodus rotundus*, poseen dientes como cuchillos para efectuar pequeños cortes en la piel de la presa, de los que lamen la sangre que comen. Los vampiros son buenos voladores, pero son insólitos entre los Quirópteros por sus largos pulgares y extremidades posteriores robustas, que les permiten acercarse andando, no volando, a sus víctimas.



LOS MURCIELAGOS QUE SE ALIMENTAN de néctar, como este *Glossophaga soricina*, el murciélago nectario o lengüilargo, poseen dientes simplificados y hocicos alargados que encajan en el interior de las flores. Muchos poseen una lengua larga y extensible, parecida a la de los osos hormigueros. Algunos presentan, en el extremo de la lengua, papilas en pincel, con las que extraen néctar de la base de flores tubulares. Muchos murciélagos nectarios son pequeños y poseen alas cortas y fuertes para cernerse.

La diversidad de los murciélagos modernos tiene raíces antiguas. Fósiles de un yacimiento en Messel revelan que, hace 47 millones de años, los Quirópteros habían empezado a especializarse en la depredación de ciertos tipos de insectos. Los fósiles de Messel conservan el contenido estomacal de esos animales, lo que no deja duda alguna acerca de qué comían. Se desconoce todavía dónde comían, pero el tamaño y la forma de sus alas proporciona una base para la especulación.

ALEMANIA
Messel



***PALAEOCHIROPTERYX* comía pequeñas polillas y frigáneas. Dado su cuerpo pequeño y sus cortas alas, es probable que se alimentara cerca del suelo y la vegetación; cazaba desde reposaderos y se precipitaba, con un vuelo lento, sobre los insectos.**



***ARCHAEONYCTERIS* se alimentaba de escarabajos. Al igual que *Palaeochiropteryx*, este murciélago de alas cortas cazaba probablemente cerca de la vegetación. Pero quizá se especializó en espigar insectos situados sobre superficies en lugar de atraparlos en vuelo.**



***HASSIANYCTERIS* comía polillas grandes y escarabajos. Es el mayor murciélago hallado en Messel. Poseía alas estrechas; con un vuelo veloz, cazaba en espacios abiertos cerca de lagos y sobre el dosel arbóreo.**

rápidos de diversificación de este tipo tienen lugar tras producirse un avance adaptativo crucial. Los murciélagos actuales se clasifican en diecinueve familias; los quirópteros fósiles representan otras siete. Estudios de secuencias de ADN de genes múltiples, calibrados en su temporalidad, indican que los 26 grupos eran ya evidentes a finales del Eoceno. Una "gran explosión" de diversificación sin precedentes en la historia de los mamíferos.

Sin embargo, el vuelo y la ecolocación no fueron los únicos factores que contribuyeron a dicha radiación. El origen de estos linajes principales de murciélagos coincidió, al parecer, con un aumento de la temperatura media anual, incremento notable de la diversidad vegetal y un máximo en la diversidad de los insectos. Desde los rápidos escarabajos voladores hasta las frigáneas, las cucarachas y las diminutas polillas que revoloteaban, un depredador aéreo habría dispuesto de un verdadero buffet de insectos entre los que elegir. Y al ser los únicos depredadores voladores nocturnos, aparte de las lechuzas y los chotacabras, los murciélagos habrían tenido pocos competidores para los copiosos recursos de la noche eocénica.

Los fósiles hallados en la alemana Messel proporcionan un atisbo de esta diversificación temprana. Pese a sus 47 millones de años de antigüedad, estos especímenes son sólo algo más jóvenes que los murciélagos de la Formación Green River y muestran, en cambio, mayor variabilidad. Desde que empezaron las excavaciones en el decenio de los setenta, se han hallado en Messel siete especies de quirópteros: dos especies de *Archaeonycteris*, dos de *Palaeochiropteryx*, dos de *Hassianycteris* y *Tachypteron franzeni*, el miembro más antiguo conocido de la familia de los Embalonúridos (murciélagos de cola de vaina), que tiene representantes actuales.

No es difícil comprender por qué los murciélagos medraron en Messel. Durante el Eoceno, reinaba allí un clima templado; había varios lagos rodeados de una frondosa vegetación subtropical. A juzgar por la abundancia de restos fósiles, se contaban por miles los insectos aéreos, acuáticos y terrestres a disposición de quien los pudiera cazar. Que no otra cosa hicieron los murciélagos de Messel. Las siete especies eran insectívoras, pero cada una se especializó en un subconjunto de insectos. Así lo demuestra el contenido conservado de su estómago: *Palaeochiropteryx* comía pequeñas polillas y frigáneas; *Hassianycteris* prefería polillas de mayor tamaño y escarabajos; *Archaeonycteris* se limitaba quizás a una dieta exclusiva de escarabajos; de *Tachypteron* no se conservan contenidos estomacales, pero sabemos por la forma de sus dientes que era insectívoro.

¿De qué subsistían *Onychonycteris* e *Icaronycteris*? Carecemos de los contenidos estomacales necesarios para responder a la cuestión de manera directa. Pero el análisis de sus dientes y la abundancia de insectos fósiles hallados en las rocas de la Formación Green River nos remiten a unos hábitos insectívoros. La mayoría de los murciélagos actuales subsisten también con insectos. Sólo más adelante en la historia evolutiva del grupo empezarían algunos murciélagos a comer carne, peces, frutos, néctar, polen e incluso sangre.

Filogenia

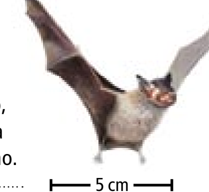
Los fósiles hallados en Messel y en la Formación Green River han resultado fundamentales para trazar el auge de los Quirópteros. Aun así, carecemos de fósiles que revelen las relaciones de los murciélagos con los demás mamíferos. Los colugos, o caguanes, mamíferos placentarios arborícolas y planeadores, guardan un estrecho parecido con los murciélagos. Durante largo tiempo se creyó que eran parientes cercanos.

Sin embargo, a lo largo de los últimos 14 años, Mark S. Springer, de la Universidad de California en Riverside, y otros han realizado estudios de ADN de un número extenso de especies de mamíferos, que han demostrado que los murciélagos no son parientes próximos de ninguno de los grupos de mamíferos placentarios que incluya animales planeadores, tales como los colugos y las ardillas voladoras. (Con todo, estos animales ofrecen modelos convincentes del aspecto que pudo haber tenido la estructura de las extremidades de los antepasados de los murciélagos.)

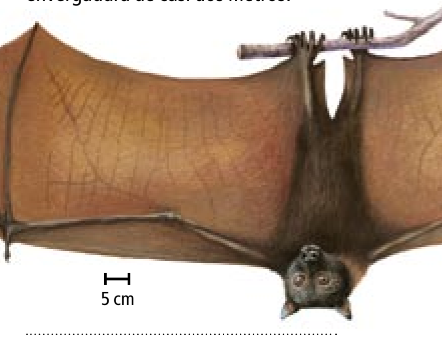
Los análisis genéticos sitúan a los Quirópteros en una estirpe antigua, la de los Laurasiaterios. Otros miembros modernos de este grupo incluyen animales muy dispares: carnívoros, mamíferos con pezuñas, ballenas, pangolines, musarañas, erizos y topos. Sin embargo, los laurasiaterios primitivos eran probablemente animales del tamaño de un ratón o de una ardilla, que andaban a cuatro patas y comían insectos. Se cree que los Laurasiaterios evolucionaron en el antiguo supercontinente de Laurasia, que comprendía lo que en la actualidad es Norteamérica, Europa y Asia, probablemente a finales del Cretácico, hace entre 65 y 70 millones de años. La posición exacta de los murciélagos dentro de este grupo es incierta, pero resulta evidente que una amplia transformación evolutiva separa a *Onychonycteris* y a otros murciélagos de sus antepasados terrestres.

MURCIELAGOS EXTREMOS

EL MAS PEQUEÑO
Craseonycteris thonglongyai, el murciélago abejorro, pesa menos que una moneda de 1 céntimo.



EL MAS GRANDE
Pteropus vampyrus, el zorro volador grande, tiene una envergadura de casi dos metros.



EL MAS RUIDOSO
Noctilio leporinus, el murciélago bulldog común, emite un chillido de frecuencia elevada que puede tener más de 140 decibelios: 100 veces más fuerte que un concierto de rock.

EL MAS GREGARIO
Tadarida brasiliensis, el murciélago rabudo mexicano, vive en colonias de millones de individuos. La cueva Bracken, a las afueras de Austin, alberga 20 millones de estos animales, la mayor colonia conocida.

LA LENGUA MAS LARGA
Con 8,5 centímetros, la lengua de *Anoura fistulata*, el murciélago nectarívoro de labio tubiforme, supone el 150 por ciento de la longitud del cuerpo. Este murciélago se alimenta del néctar de las flores tubulares de *Centropogon nigricans*, de la que es el único polinizador conocido.

MICHAEL DURHAM *Minden Pictures* (*Eptesicus fucus*); MERLIN D. TUTTLE *Conservación Internacional de Murciélagos, www.batcon.org* (*Vampyrum spectrum*); MERLIN D. TUTTLE *Conservación Internacional de Murciélagos, www.batcon.org* (*Ectophylla alba*); HEUCLIN DANIEL *Peter Arnold, Inc.* (*Desmodus rotundus*); MERLIN D. TUTTLE *Conservación Internacional de Murciélagos, www.batcon.org* (*Glossophaga soricina*); JOHN CANCALOSI *Photo Researchers, Inc.* (*Palaeochiropteryx*); JACANA *Photo Researchers, Inc.* (*Archaeonycteris*); CORTESIA DE JÖRG HABERSETZER *Instituto Senkenberg de Investigación* (*Hassianycteris*); LILA RUBENSTEIN (*murciélagos*); FUENTE: NATHAN MUCHHALA Y MURRAY COOPER (*A. fistulata*)

Algunos de estos cambios, de animal terrestre a volador, pudieron haber ocurrido con asombrosa prontitud, a tenor de hallazgos recientes en el campo de la genética del desarrollo. Aunque cortos según la norma en los Quirópteros, los dedos de *Onychonycteris* son muy largos en comparación con los de otros mamíferos. ¿Cómo pudo haberse producido por evolución dicho alargamiento?

En 2006, Karen E. Sears, hoy en la Universidad de Illinois, y sus colaboradores apuntaron que la respuesta podía residir en la actividad de genes que controlan el crecimiento y alargamiento de los dedos de la mano durante el desarrollo. La comparación de pautas de crecimiento en embriones de murciélagos y ratones reveló diferencias notables en la proliferación y la velocidad de maduración de las células del cartílago en los dedos en desarrollo. Las proteínas morfogenéticas del hueso (BMP) desempeñan una función fundamental en el control de dichos procesos y en la determinación de la longitud que alcanzan los dedos. Una de dichas proteínas, la BMP2, presenta niveles superiores en los dedos de murciélagos que en los de ratones; además, la alteración del gen que produce esta proteína modifica la longitud del dedo. Por tanto, es posible que un pequeño cambio en los genes que regulan las BMP se halle en la base del desarrollo y el alargamiento evolutivo de los dedos del ala de los murciélagos. De ser así, ello explicaría la ausencia en el registro fósil de animales intermedios entre los mamíferos no voladores, de dedos cortos, y los murciélagos de dedos largos como *Onychonycteris* e *Icaronycteris*: el cambio evolutivo pudo haber sido muy rápido, de modo que habrían existido pocas formas de transición, si alguna.

A pesar de los numerosos hallazgos sobre el auge de los Quirópteros, persisten algunos interrogantes. Tuvo que haber antepasados de los murciélagos antes del Eoceno, pero no tenemos registro fósil de ellos. Además, sigue sin conocerse la identidad de los parientes más próximos de los murciélagos. A los investigadores les gustaría saber en qué momento la estirpe de los quirópteros se diferenció de la de los demás laurasiaterios y cuánta de la evolución inicial y de la diversificación de los murciélagos se produjo en los continentes septentrionales, en comparación con la desarrollada en los australes. Necesitamos fósiles más próximos todavía que *Onychonycteris* del inicio de los murciélagos. Con suerte, los paleontólogos encontrarán especímenes, que nos ayudarán a resolver estos y otros enigmas sobre los orígenes de unos animales tan fascinantes.

Bibliografía complementaria

BATS IN QUESTION: THE SMITHSONIAN ANSWER BOOK. Donald E. Wilson. Smithsonian Books, 1997.

THE BIOLOGY OF BATS. Gerhard Neuweiler. Oxford University Press, 2000.

A MOLECULAR PHYLOGENY FOR BATS ILLUMINATES BIOGEOGRAPHY AND THE FOSSIL RECORD. Emma C. Teeling *et al*. en *Science*, vol. 307, págs. 580-584; 28 de enero, 2005.

DEVELOPMENT OF BAT FLIGHT: MORPHOLOGIC AND MOLECULAR EVOLUTION OF BAT WING DIGITS. Karen E. Sears, Richard R. Behringer, John J. Rasweiler y Lee A. Niswander en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 103, n.º 17, págs. 6581-6586; 25 de abril, 2006.

PRIMITIVE EARLY EOCENE BAT FROM WYOMING AND THE EVOLUTION OF FLIGHT AND ECHOLOCATION. Nancy B. Simmons, Kevin L. Seymour, Jörg Habersetzer y Gregg F. Gunnell en *Nature*, vol. 451, págs. 818-821; 14 de febrero, 2008.

¿Qué es la ontología génica?

Los estudios genómicos a gran escala cuestionan la definición tradicional de gen y demandan un enfoque nuevo para la clasificación molecular de la vida

Michael Seringhaus y Mark Gerstein

CONCEPTOS BASICOS

- La definición tradicional de gen ha quedado superada por la ingente cantidad de resultados que arroja la genómica moderna.
- Los genes entrañan una complejidad mucho mayor que la imaginada. Ya no podemos asociarlos a un fragmento simple de ADN, que se transcribe luego en una proteína con una secuencia aminoacídica y función concretas.
- Se requiere una nueva definición, nomenclatura y sistema de clasificación genéticos que reflejen la complejidad molecular de la vida.

Definir las partes esenciales que conforman la naturaleza es propio del estudio del mundo orgánico. Los físicos se centraron en el átomo; los biólogos moleculares hicieron del gen su unidad fundamental. Fue una elección inteligente, ya que todas las propiedades observables de cualquier organismo del planeta derivan de la acción de uno o más genes. El gen se concibió primero como la encarnación física de la teoría de la herencia de Gregor Mendel. Hacia la mitad del siglo XX, la ciencia molecular afinó la idea: los genes se convirtieron en tramos concretos de secuencia nucleotídica; cada uno daba lugar a un transcrito de ARN, que se traducía en una proteína con una función biológica tangible.

Hoy en día, la genómica de punta aporta cada mes datos de miles de productos de genes, que amplían nuestra visión. La unidad básica de la biología no está resultando ni tan uniforme ni tan precisa como se pensaba. Por consiguiente, deben adaptarse los métodos de clasificación de los genes y de sus productos. Según advirtiera Confucio, un lenguaje defectuoso engendra un significado erróneo. Pero, ¿cuál es el camino que nos conducirá hacia una mayor precisión? Antes de responder, debemos conocer cómo hemos llegado hasta aquí.

Una idea fecunda

La palabra "gen" se desgajó del tronco "pangén", que designaba las entidades implicadas en la pangénesis, hipótesis sobre el mecanismo de la herencia suscrito por Darwin. Los términos griegos de partida eran *genesis* ("nacimiento") o *genos* ("origen"). El vocablo "gen" fue introducido por Wilhem Johannsen en 1909, que se basó en un concepto desarrollado por Mendel en 1866. En sus famosos experimentos de cruzamientos de plantas del guisante, Mendel mostró que ciertos rasgos (la altura y el color de las flores) no aparecían mezclados en la progenie, sino que se transmitían como entidades distintas y discretas. Además, demostró que las variaciones en esos caracteres se debían a variaciones en factores hereditarios (en terminología moderna, mostró que el genotipo dictaba el fenotipo).

En los años veinte del siglo pasado, Thomas Hunt Morgan demostró que el ligamiento genético, la tendencia de ciertos genes a presentarse juntos, se correspondía con la proximidad física de los genes en los cromosomas. George Beadle y Edward Tatum demostraron que las mutaciones génicas afectaban a etapas específicas de las rutas metabólicas, de cuyos resultados derivó la idea de "un gen, una proteína". A continuación, una serie de experimentos establecieron que el ADN constituía el vehículo molecular de la herencia, proceso que culminó en 1953 con la solución de la estructura tridimensional del ADN por James Watson y Francis Crick.

La doble hélice constituida por dos cadenas, que interaccionan a través de sus pares de



1. UN COLECCIONISTA de sellos sabría poner orden en este caos. Los biólogos presentan también una larga tradición clasificadora; organizan seres emparentados, aunque dispares, en razón de la edad, lugar de origen, forma y otros rasgos. ¿Cabría pensar la vida de otro modo? Recordemos dónde llegó Darwin con su minucioso recuento de los pinzones de las Galápagos o Thomas Hunt Morgan con su análisis detallado de la mosca del vinagre. Los experimentos de genómica avanzada (estudios de secuenciación, investigación transcripcional y el resto) plantean nuevas oportunidades y retos a la clasificación génica. Para sacar pleno provecho de ese dominio de la investigación, se necesitan nuevos métodos de catalogación molecular de la vida.

HILLEL STEINBERG/*Alamy Limited/American Scientist*

bases complementarias, explica con elegancia la copia en generaciones sucesivas del material genético y la introducción de mutaciones, por errores aleatorios de replicación, en los cromosomas hijos. El desciframiento del código genético realizado por Crick sentó las bases para la formulación del dogma central de la biología molecular: la información se transmite del ADN a la proteína por mediación del ARN. En este esquema, un gen corresponde a una región de ADN (locus) que se expresa en forma de ARN mensajero (ARNm) y éste se traduce en un polipéptido (una proteína necesaria para construir o hacer funcionar una parte de una célula). Esta versión del diseño de la vida, con las excepciones de los genomas de ARN de algunos virus, corresponde a la imagen que condujo a los científicos hasta el atrio de la era genómica.

Pero esta visión se ramifica más allá del plano de la secuencia nucleotídica. El dogma central da origen también al "dogma ampliado" de la biología molecular. Dentro de este marco conceptual, un transcrito de ARNm (que corresponde a un gen) da lugar a una cadena polipeptídica, que, a su vez, se pliega para formar una proteína funcional. Se piensa que esta molécula desempeña una función celular diferenciada y perceptible, como catalizar una reacción bioquímica específica. El gen se autorregula mediante el promotor y los sitios de unión a factores de transcripción que se alojan en el ADN próximo al gen.

La nomenclatura genética progresó hasta reflejar la hipótesis de que a cada gen le corresponde una función. A cada gen se le ha dado un nombre. Nombres y funciones asociadas se han ordenado en un sistema de clasificación simple. Tal clasificación procede desde unas categorías funcionales amplias (por ejemplo, genes cuyos productos catalizan una reacción de hidrólisis o se unen a otras moléculas) hacia funciones más específicas (la denominación "amilasa" describe la reacción de hidrólisis que descompone el almidón).

Los primeros esbozos de ese tipo de clasificación funcional se iniciaron en los años cincuenta del siglo pasado con la creación de la Comisión Internacional de Clasificación de Enzimas y el Centro de Información de Secuencias Proteicas de Múnich. Esta concepción centrada en la función sigue operativa en las bases actuales de datos: los genes y sus productos se clasifican por el nombre y los artículos

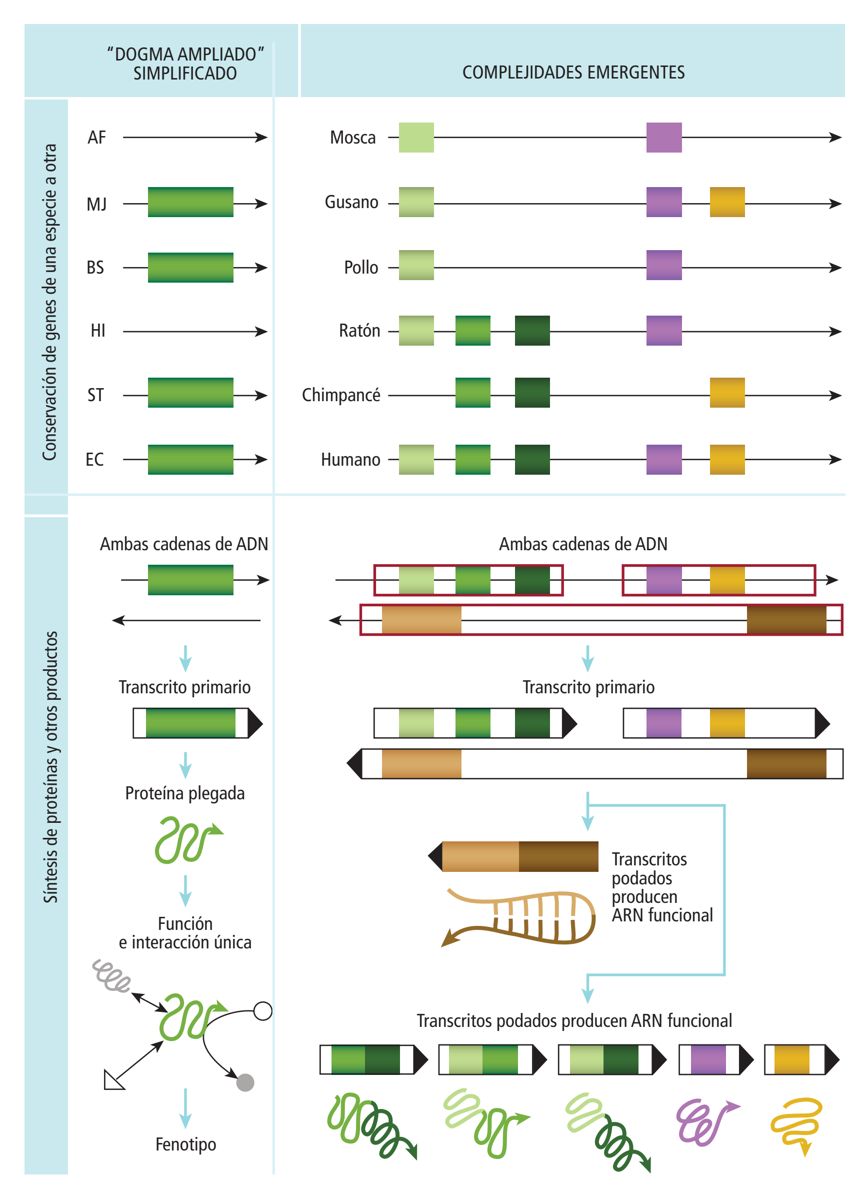
de investigación relacionados se indexan con esos nombres. Los catalogadores leen detenidamente el manuscrito y lo sintetizan en un enunciado sencillo que resume la función de cada gen, según aparece descrito en la bibliografía. La anotación de marras permite situar un gen dentro de un panorama funcional más amplio.

La asociación iterativa "*un* gen, *una* proteína, *una* función" dibuja una perspectiva bastante lineal de la vida subcelular. Al describir la función de determinado gen en una célula, los biólogos conciben una proteína constituida en una unidad indivisible o nodo dentro de una red celular más extensa. A su vez, al cartografiar genes a través de distintas especies, apoyados en la semejanza de secuencia, se da por supuesto la persistencia de una proteína en organismos diversos, o su ausencia en los mismos. Así, proteínas relacionadas que se hallan en organismos distintos se agrupan en familias coherentes, que proporcionan una descripción unitaria y simple de la función proteínica. De ese modo, el dogma ampliado expande el dogma central al incluir regulación, función y conservación.

Realidad compleja

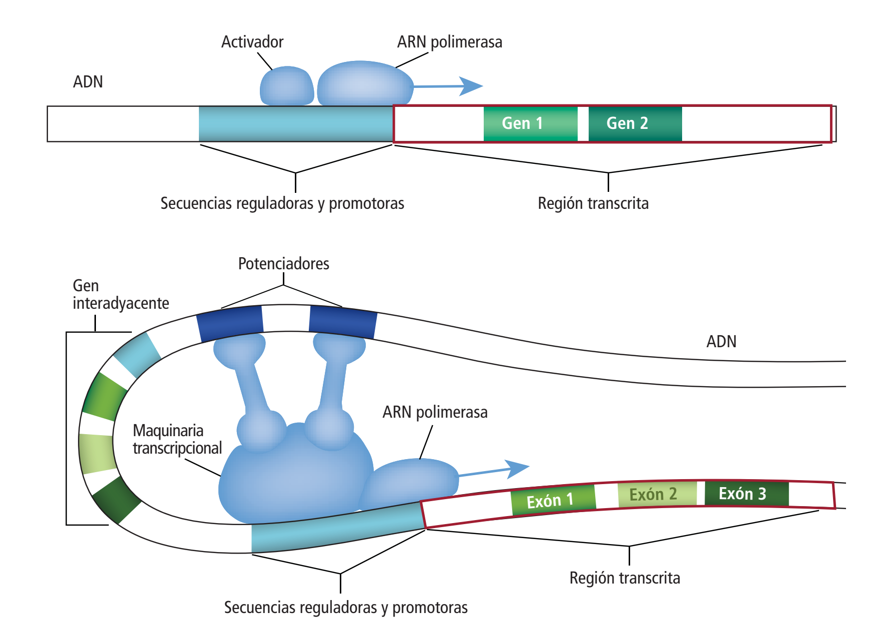
Para la genómica moderna, la imagen clásica de un gen y el dogma ampliado con el que se relaciona han quedado envejecidos. Los experimentos avanzados que analizan de forma simultánea la actividad de millones de bases en el genoma ofrecen una perspectiva menos nítida. En primer lugar, el proceso de crear un transcrito de ARN a partir de una región de ADN es más complejo de lo que se pensaba. Los genes constituyen sólo una fracción limitada del genoma humano. No obstante, los estudios de expresión del ARN en ADN humano sugieren que se transcribe una proporción notable del genoma fuera de los límites de genes conocidos o predichos. En concordancia con estos análisis hallamos los resultados de la fase piloto del proyecto de la Enciclopedia de los Elementos del ADN (ENCODE), publicados en 2007. Esta colaboración internacional se propone identificar todos los elementos funcionales del genoma humano. Los estudios piloto en un uno por ciento representativo del genoma (alrededor de 30 millones de bases) indican que la transcripción no génica está muy extendida, aunque se desconoce en qué cuantía exacta.

Se ignora también la función de ese material transcrito no génico. Ni resulta obvio cuál sería el mejor sistema de clasificación y nomenclatura. Puesto que la nomenclatura génica está asociada a genes discretos, las regiones transcritas cortas que se ubican a extramuros de los genes identificados resultan problemáticas. A veces, acaban catalogadas en bancos de datos de secuencia exhibiendo etiquetas similares a las de los genes, lo que induce a confusión. Para complicar más las



STEPHANIE FREESE; ADAPTADO DE M. B. GERSTEIN, *et al*, 2007/*American Scientist*

2. LOS CONCEPTOS DE EXPRESION Y CONSERVACION génica han evolucionado de lo simple a lo complejo. A la izquierda, una región de ADN da lugar a un transcrito primario y a una proteína plegada con la función exclusiva de participar en un grupo de interacciones con otras moléculas que originan un fenotipo perceptible. A la derecha se encuentra la visión contemporánea, más complicada. Los fragmentos de ADN que codifican productos funcionales se dividen en varias regiones (exones) dentro de un cromosoma. Las regiones transcritas de un largo transcrito primario se podan para obtener transcritos más cortos, que dan lugar a productos funcionales. Este corte y empalme (*splicing*) acontece de maneras muy diversas, con la mezcla y el encajamiento de diferentes regiones del ADN. Los transcritos pueden generar ARN funcionales o proteínas que se pliegan. En el modelo simplificado (*arriba, izquierda*), un polipéptido asociado con un gen se conserva en su totalidad de una especie a otra; se muestran algunos procariotas representativos: AF (*Archaeoglobus fulgidus*), MJ (*Methanococcus jannaschii*), BS (*Bacillus subtilis*), HI (*Haemophilus influenzae*), ST (*Streptococcus thermophilus*) y EC (*Escherichia coli*). Por el contrario, en los eucariotas superiores (*arriba, derecha*), podrían o no conservarse fragmentos grandes y pequeños del gen (a menudo exones). En ocasiones, los patrones de conservación ni siquiera se ajustan a los límites de los exones.



3. EN LA REGULACION GENICA participa un número mayor de mecanismos que el esperado en un principio. En las bacterias (*arriba*), los represores y activadores de los mecanismos reguladores operan muy próximos a los genes. El gen es transcrito por la ARN polimerasa. En los eucariotas, la polimerasa transcribe también el gen, pero las regiones de control concernidas podrían hallarse a decenas de miles de nucleótidos de la región codificadora diana, con genes que no están implicados en esta regulación interpuestos (*gen interadyacente*). Las propiedades físicas del ADN, su capacidad de enrollarse y de doblarse, acercan a los componentes reguladores alejados.

cosas, los experimentos de transcripción no génica (de zonas sin genes) muestran que parte de esa actividad se desarrolla en pseudogenes, regiones del genoma antaño consideradas fósiles de genes pasados. Desde el punto de vista transcripcional, parecen genes muertos que vuelven a la vida; ciertos indicios sugieren que pueden incluso participar en la regulación de otros genes.

Debe también prestarse atención al fenómeno del corte y empalme (*splicing*) alternativo. En eucariotas, los genes se componen de cortas regiones codificantes de ADN (exones), separadas por largas regiones de ADN (intrones). Desde hace tiempo sabemos que los intrones se transcriben en ARN, que se poda antes de fabricar las proteínas. Sin embargo, existen ahora indicios de que, para un determinado locus genético, este corte y empalme se lleva a cabo de múltiples formas. En ocasiones, se omiten en el producto final exones individuales. En otras, se conservan sólo ciertas partes de la secuencia en un exón.

Cuando una secuencia situada fuera de los límites convencionales de un gen experimenta corte y empalme, el número de variantes aumenta. Lo que una vez se pensó que era un mecanismo fiable para eliminar intrones de un gen para dar lugar a un solo producto origina numerosas variantes de un mismo gen. También en este caso, se trata de una variabilidad mayor de lo que antaño se suponía.

Otra de las ideas que están cambiando es nuestra concepción de la regulación génica. La visión tradicional partía del supuesto de que la porción del gen codificadora de una proteína y sus secuencias reguladoras ocupaban lugares vecinos en el cromosoma; en ciertas definiciones, las áreas reguladoras se consideraban parte del gen. Durante largo tiempo, la versión clásica de la regulación génica se vino enseñando a través del operón *lac*, un ejemplo bacteriano simple de represores, operadores y promotores agrupados, próximos entre sí. Este modelo describe una relación directa y cercana entre factores de transcripción y genes con secuencias reguladoras que preceden a un gen particular.

Pero este esquema sencillo no se ajusta a los sistemas del rango de mamíferos o de otros eucariotas superiores. En éstos, los genes son regulados por secuencias muy distantes, situadas "curso arriba" del gen, potenciadoras que se alojan a unos 50.000 pares de bases del mismo, incluso más allá de genes adyacentes. El enzarcillamiento y plegamiento del ADN facilita el acercamiento entre tramos linealmente distantes. Además, la actividad del gen se halla sometida a modificaciones epigenéticas: alteraciones químicas que o bien modifican al ADN (mediante la unión de grupos metilos, o metilación) o bien alteran las histonas, las estructuras de soporte del ADN cromosómico. En función de dichas modificaciones, un gen puede ser activo o silente en circunstancias distintas sin cambiar su secuencia. Ello cuestiona todavía más la idea de que, para designar un gen, basta una secuencia de ADN en una región individual.

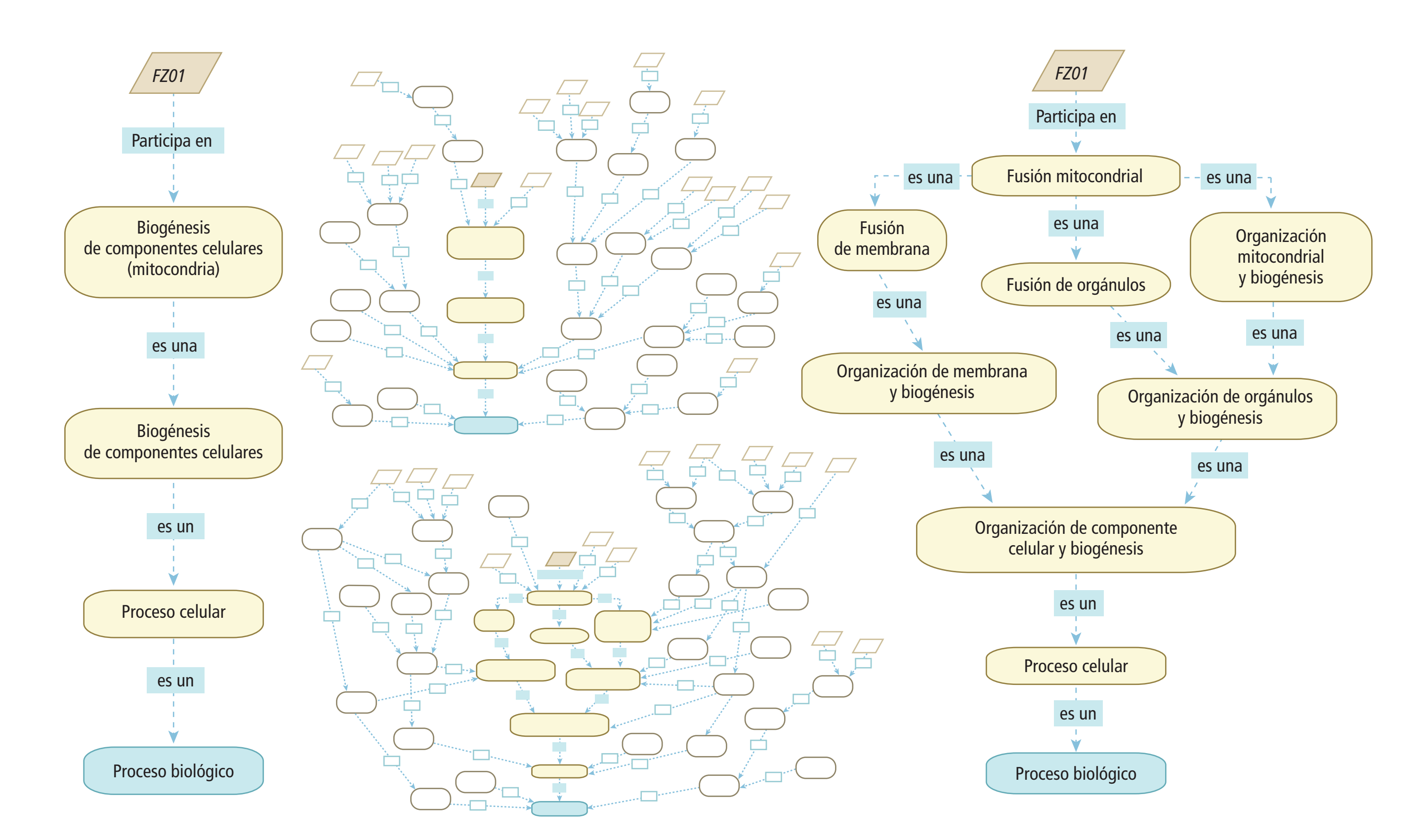
Las peculiaridades transcripcionales y reguladoras que acabamos de exponer nunca han encajado con el concepto tradicional de gen, pero se creía que eran casos excepcionales. De nuevo, los resultados de ENCODE sugieren que las desviaciones del modelo tradicional podrían constituir la regla.

Función génica

La definición de las unidades básicas constituye sólo una parte del proyecto de descripción de los sistemas biológicos. En última instancia, de lo que se trata es de comprender la función biológica. En un principio, la función génica se infería a partir de los efectos fenotípicos de los genes. Dado que un individuo podría tener los ojos azules o verdes, a un gen relacionado con ese rasgo se le asignaría la función "color de ojos". Ese tipo de función fenotípica se muestra con mayor claridad mediante la supresión o alteración (*knocking out*) de un gen. Alteración génica que podría dar lugar a que un organismo desarrollara un cáncer, cambiara de color o muriera precozmente. A modo de botón de muestra, la incapacitación del gen mitocondrial de levadura *FZO1* hace que las cepas mutantes muestren un crecimiento lento y un fenotipo de deficiencia respiratoria (*petite*).

Pero un efecto fenotípico no explica la función molecular del gen. Para elucidar la im-

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*



STEPHANIE FREESE; DR. JANE LOMAX (*Datos suministrados por QuickGO: ebi.ac.uk/ego/*)/*American Scientist*

4. VARIOS METODOS se aplican a la descripción de la función génica. En una jerarquía simple (*izquierda*), un gen se describe a partir de relaciones individuales. Una unidad desciende de un "progenitor". Los gráficos dirigidos acíclicos (DAG) reflejan un grado mayor de complejidad. La jerarquía simple muestra que *FZO1* desempeña una función en la biogénesis de los componentes celulares; el DAG, en cambio, ofrece una panorámica más amplia del alcance de estas funciones.

portancia de un gen, hemos de conocer la bioquímica de sus productos. Siguiendo con el modelo, el gen de levadura *FZO1* presenta una actividad enzimática GTPasa, una acción molecular que no se deduce de forma inmediata de su efecto fenotípico último. Sabemos que la proteína FZO1 ayuda a fusionar las membranas mitocondriales en levaduras mediante la protección de las centrales energéticas de la célula. El efecto bioquímico explica el efecto fenotípico.

Para comprender la función génica resulta también clave identificar los procesos o rutas que sigue, en una célula determinada, el producto de un gen. Un gen puede participar en la secreción o la síntesis de aminoácidos y clasificarse así por su función. La localización de una proteína en uno o varios compartimentos celulares aporta un criterio adicional de clasificación funcional. Puede encontrarse una proteína sólo en el núcleo o en la membrana celular. Como cabía esperar, la proteína FZO1 se aloja en la membrana mitocondrial de levaduras.

Decidir qué cualidades de un gen y sus productos se necesitan para registrarlo, describirlo y clasificarlo no es asunto baladí. Todos los enfoques mencionados para acometer una clasificación funcional dan por sentado un esquema de clasificación jerárquico lineal (un gen X es miembro de un grupo Y, que a su vez forma parte de la superclase Z). Debido a la complejidad de la clasificación funcional, se están adaptando y mejorando las jerarquías para que éstas integren la información procedente de múltiples niveles funcionales.

De la secuenciación generalizada del genoma y la avalancha de datos que se deriva de ella emergió un sistema que goza de amplio predicamento, el de la Ontología del Gen (GO, de "Gene Ontology"). Este sistema entraña mayor complejidad que una jerarquía simple, puesto que emplea una estructura de grafos dirigida y acíclica (DAG, de "directed acyclic graph"). La clasificación de los DAG y la de las jerarquías simples proceden de lo general a lo específico. No obstante, un DAG es más flexible porque puede tener múltiples progenitores para cualquier nudo. En una jerarquía simple, un gen presenta sólo un progenitor o clasificación funcional; en el DAG, en cambio, habrá múltiples. Por dar un ejemplo: el producto de un gen puede pertenecer a un subconjunto de proteínas implicadas en el control del ciclo celular y, al propio tiempo, formar parte de un grupo de factores de transcripción. La descripción de las entidades individuales resulta así más completa.

La propuesta de los DAG adolece de ciertos defectos: la ampliación de la clasificación depende del grado de conocimiento disponible sobre un proceso celular concreto. No todos los aspectos de la vida subcelular se han estudiado con similar hondura, un hecho que refleja, más que la complejidad biológica, los intereses de la comunidad científica y de

NOMBRES DE GENES EXTRAVAGANTES

Literatura
- Amontillado
- Luciferasa
- Thor
- Tigger
- Ariadne
- Malvolio
- Tinman

Cultura popular
- Sonic hedgehog
- Tribbles
- Pokemon
- Kojak
- Groucho
- Maggie
- Glass-bottom boat

Coches y conducción
- Sunday driver
- Limo
- 18wheeler
- Long island expressway

Gente
- Scott of the antarctic
- Evander
- Van Gogh
- Cleopatra

Comida
- Chardonnay
- Swiss cheese
- Moonshine

STEPHANIE FREESE/*American Scientist*

5. LOS NOMBRES DE LOS GENES esconden historias peculiares. Por botón de muestra, el gen llamado inicialmente *evander*, identificado en el pez cebra. Los peces con formas mutantes del gen tienen oídos y mandíbulas deformados. Se le impuso en un comienzo tal nombre en recuerdo de Evander Holyfield, boxeador al que Mike Tyson mordió una oreja. Debido a la vacilación de uno de los investigadores, el nombre del gen se cambió a *hearsay* antes de publicarse su secuencia (información sobre los nombres de los genes en: tinman.nikunnakki.info/).

los organismos que subvencionan los proyectos de investigación. En consecuencia, unas áreas de un DAG podrían mostrarse dotadas de mayor riqueza que otras, mas por razones equivocadas.

Otra estrategia para aprovechar al máximo el reciente aluvión de datos genómicos, en particular los de experimentos a gran escala que analizan de forma simultánea un número elevado de genes, consiste en atribuir características uniformes a cada gen. Los biólogos miden, mediante micromatrices de ADN, el nivel de expresión de un gen en distintas condiciones celulares. Pueden también comparar con qué fuerza se unen sus productos proteicos a una serie de metabolitos en una matriz de proteínas.

Los expertos tratan, en otra opción, de describir la función del gen en términos de circuitos o redes moleculares. Este modelo se centra menos en la actividad de un gen y más en los genes con los que éste se relaciona, a imagen de lo que se observa con las personas en la investigación sobre redes sociales.

Comprender la función de las proteínas es todo un reto. En numerosas ocasiones, un gen no determina una proteína con una sola función, a pesar de las implicaciones del dogma ampliado. Una proteína suele constar de varios dominios, segmentos de la secuencia polipeptídica con distintas estructuras plegadas que pueden cubrir un requerimiento celular específico. Una proteína que cataliza con uno de sus dominios cierta reacción incluirá quizás otro dominio que se encargue de la unión al ADN. A la inversa, cabe la posibilidad de que se requiera un mazo de proteínas determinadas por dos o tres de genes para ejecutar una función celular.

Agréguese que cualquier dominio dado podría pertenecer a una peculiar familia de proteínas que se diera en numerosas especies. Pero puede que entre especies se preserven sólo ciertos dominios, o subdominios. Intentar describir tal conservación “subgénica” con los nombres de genes tradicionales o las etiquetas de identificación de una base de datos crea la inevitable confusión. Los nombres no siempre aclaran si se conserva la proteína entera o sólo una parte.

Teniendo esto en cuenta, algunos expertos sostienen que los dominios proteínicos ofrecen una unidad básica más conveniente para la biología molecular que los genes enteros. El enfoque centrado en dominios facilita ciertas descripciones funcionales, pero dista de ser perfecto. Así, dos variantes maduras de ARNm de un gen pueden compartir el mismo exón y es de suponer que la misma estructura en el dominio; pese a lo cual, siguen determinando productos distintos, según la presencia o ausencia de una secuencia guía corta de varios nucleótidos.

Lo que el nombre designa

La falta de unas normas de nomenclatura fiables y canónicas se está convirtiendo en un asunto cada vez más apremiante en biología. Antes de la era genómica, la nomenclatura génica suponía un empeño de segundo escalón, que lograba, no obstante, denominaciones selectas, en ocasiones arbitrarias y en no pocos casos atrevidas. Sin montones de datos de secuencia por procesar y de ordenadores potentes, la cartografía de la homología de genes similares entre especies obtuvo éxitos modestos. Grupos que trabajaban en un organismo modelo, como la mosca del vinagre, la levadura o la mala hierba brasicácea *Arabidopsis*, crearon nombres informales que usaban entre ellos.

Quien identificaba un nuevo gen tenía la libertad de denominarlo a placer, sin consultar a ningún organismo internacional ni seguir unas reglas más allá de las utilizadas en su comunidad. Esas normas de nomenclatura solían ser específicas de especie. Los científicos que trabajaban con *Saccharomyces cerevisiae* solían utilizar combinaciones de tres letras y un número para designar a los genes (por ejemplo, *FZO1*). En otros sectores fueron más extravagantes: *sonic hedgehog* (Sonic el erizo) se llamó así por el protagonista espinoso de un videojuego; *yippee* expresa la versión actual del *eureka* ante un descubrimiento. Ambos genes se descubrieron en la mosca del vinagre *Drosophila melanogaster*.

Con la cifra abundante de genomas ya secuenciados, asistimos a un fenómeno incómodo: existen muchos casos de genes similares que en un organismo se denominan de un modo y en otro de otra manera. Por botón de muestra, el gen *lov-1* (localizador de la

vulva) en nemátodos y *PKD1* en el hombre, genes de interés porque, en el humano, se halla asociado con la enfermedad renal poliquística. También, nombres que tienen sentido en un contexto pueden resultar confusos en otro. Pensemos en el par de genes *superman* y *kryptonite*; significativos ambos para quienes trabajan con *Arabidopsis thaliana*, donde se observa la acción supresora de *kryptonite* sobre *superman*, carecen de relevancia semántica en los organismos donde sólo se dé uno de ellos.

Para resolver este problema, varias organizaciones se han propuesto normalizar la nomenclatura génica. El objetivo del proyecto Identificadores de las Ciencias de la Vida (Life Science Identifiers) consiste en hacer que las características identificadoras resulten coherentes y aplicables en diferentes bases de datos. Un objetivo paralelo guía a la Organización del Proteoma Humano, una asociación internacional de grupos de investigación dedicada a fomentar la proteómica (el estudio genómico de las proteínas). Una pequeña parte de la misión del Comité de Nomenclatura Genética de esta organización consiste en eliminar algunos de los nombres "chistosos" que en un contexto equivocado resultarían perturbadores. En 2007 renombraron las tres versiones humanas de los genes *fringe* descubiertos en la mosca (*lunatic fringe*, *maniac fringe* y *radical fringe*) para evitar la alarma de los pacientes. Estos genes participan en la vía de señalización del gen *notch*, tenazmente conservada a lo largo de la evolución.

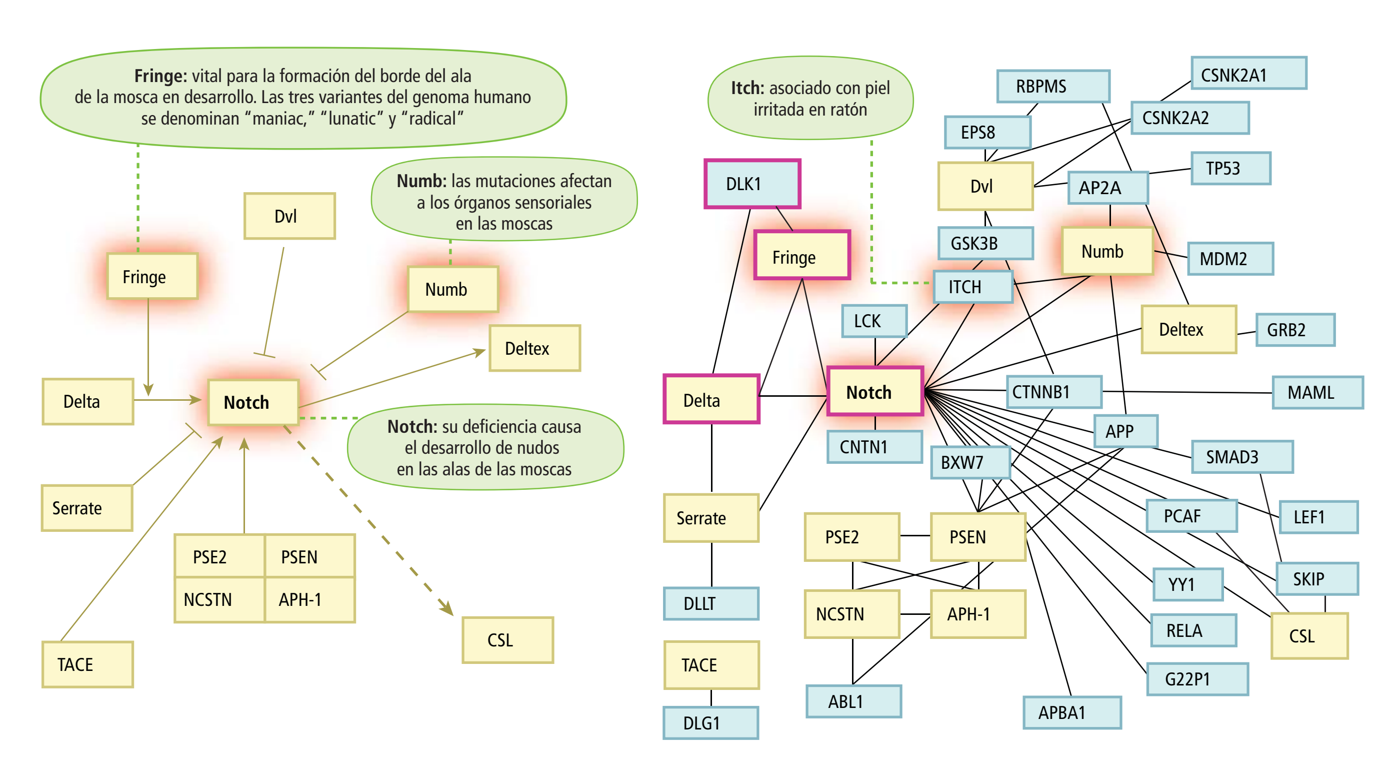
Gestión de la información

La necesidad de diseñar una nomenclatura normalizada y categorías para la clasificación no es exclusiva de la biología molecular. El problema merodea en todas las profesiones, ya sea que se ordenen estrellas en galaxias lejanas, libros en estanterías o se inventaríe el contenido de un almacén. El éxito de la Red ("World Wide Web") ha puesto de relieve la importancia de clasificar bien la información a gran escala.

Uno de los proyectos principales para la normalización de la información en línea es

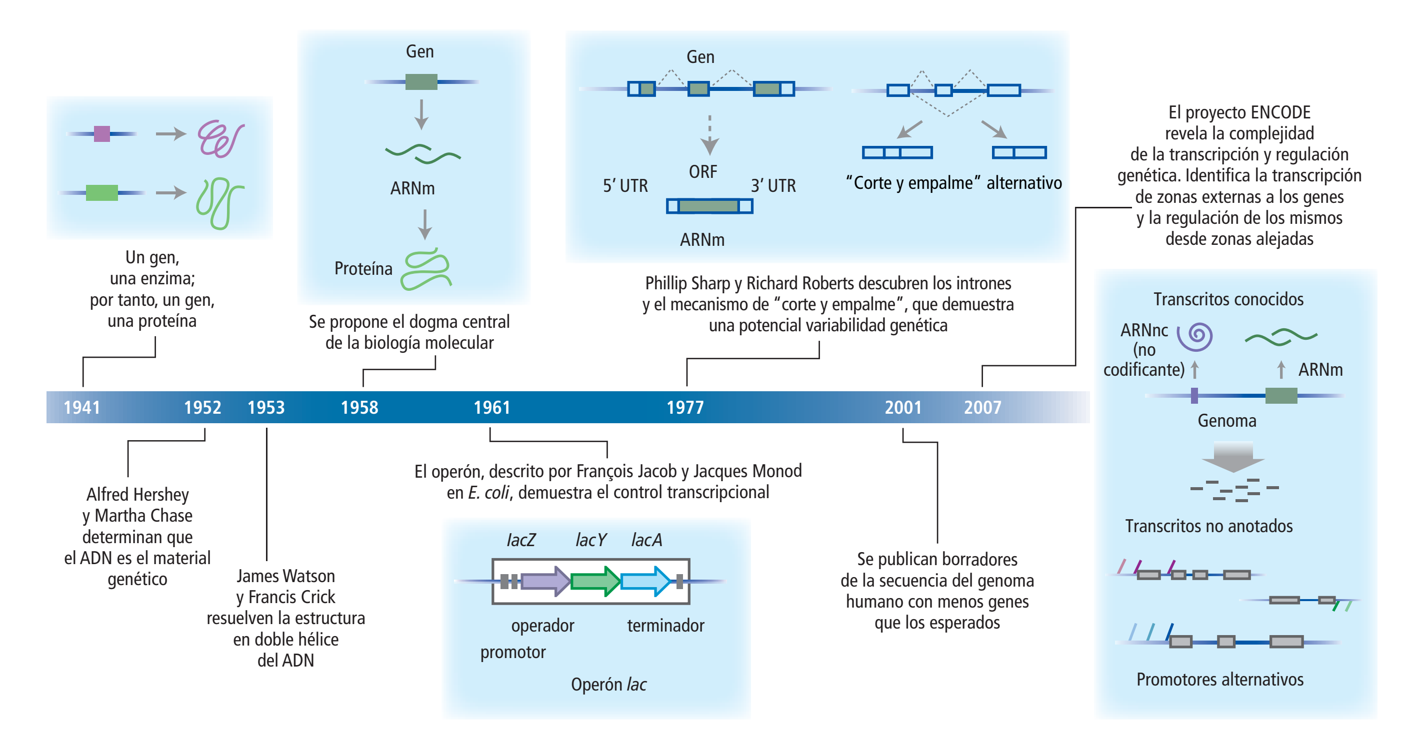
Los autores

Michel Seringhaus se doctoró en genómica y bioinformática en el departamento de biofísica molecular y bioquímica de la Universidad de Yale. En la actualidad realiza estudios en la facultad de derecho del mismo centro. **Mark Gerstein** ocupa la cátedra A. L. Williams de informática biomédica en la Universidad de Yale, en donde codirige el Programa de Biología Computacional y Bioinformática. Se doctoró en la Universidad de Cambridge.



STEPHANIE FREESE; ADAPTADO DE L. J. LU, *et al*, 2007/*American Scientist*

6. LA VIA DEL GEN *NOTCH* se ha conservado en numerosas especies. El gen *Notch* codifica un receptor proteico que fue identificado en la mosca del vinagre; cuando el gen es defectuoso da lugar a un ala con borde irregular (*notch* en inglés significa "muesca"). La proteína se extiende a lo largo de la membrana y actúa como un detonador. Tras unirse ciertas moléculas señalizadoras a su dominio extracelular, el dominio intracelular se separa y regula la expresión génica. A la izquierda se muestra un esquema tradicional de una parte de la vía de *Notch* (adaptado de la base de datos de vías de la Enciclopedia de Genes y Genomas de Kyoto, KEGG), con el gen y sus interacciones con otros miembros de la vía (*amarillo*). A la derecha, el resultado de experimentos de interacciones en humanos identifica un número mayor de proteínas que participan en la vía (*muchas en azul*). Mientras que algunos genes presentan nombres refinados (*Numb*, *Itch*), otros corresponden a códigos (*PSE2*, *BXW7*): dos nomenclaturas opuestas en la genómica contemporánea. A la izquierda, *Fringe* debe esa denominación zumbona a una de sus funciones. A la derecha, *Fringe* está representado por su interacción con tres proteínas: DLK1, Delta y Notch. Por otra parte, el gen *Notch* se describe también de varias formas: el productor de una proteína transmembrana de paso único, un gen cuya deleción da lugar a un efecto fenotípico, un miembro de una ruta de señalización particular o un elemento que interacciona con los factores aquí representados.



7. LA INTENSA INVESTIGACION realizada en el transcurso del siglo XX ahondó en la estructura y función del ADN, las proteínas y los genes. En el siglo XXI, la genómica complicará en gran medida lo que conocemos hoy. Los experimentos de alto rendimiento, incluidos los futuros estudios ENCODE, arrojarán gran cantidad de datos. Sacar el mayor provecho de ellos será uno de los retos principales.

STEPHANIE FREESE; ADAPTADO DE M. B. GERSTEIN, *et al*, 2007/*American Scientist*

la Red Semántica, una herramienta distintiva de la Red de próxima generación [*véase* "La Red semántica", por T. Berners-Lee, J. Hendler y Ora Lassila; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2001, y "La Red semántica en acción", por Lee Feigenbaum, Ivan Herman, Tonya Hongsermeier y otros; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero 2008]. En ella, los hiperenlaces son algo más que simples conexiones; representan relaciones estandarizadas entre un par de entidades. Un enlace dado desde la página web de un estudiante de secundaria a otro mostraría la relación con esa persona ("amigo de"). Enlaces desde una página sobre recambios de automóvil indicarían el modelo de coche para el que cada pieza fue diseñada (señalarían la asociación "recambio de"). Es fácil imaginar cómo podría explotarse una página web "etiquetada" así para extraer información.

Pero, ¿cómo deberían organizarse y normalizarse todas esas relaciones? Los expertos en computación abordan este problema mediante especificaciones precisas para el desarrollo de un sistema conceptual de clasificación, una ontología informática. Ahora bien, la creación de una ontología entraña ciertos retos: para tener una información completa sobre un campo determinado se requiere una enorme cantidad de conocimiento específico del área en cuestión. Una sola persona (o grupo reducido) no posee los conocimientos suficientes; para cubrir un dominio entero se requiere un esfuerzo colectivo.

De manera informal, la recopilación, a partir de "muchos ojos", de inteligencia distribuida para crear una clasificación aproximada ha resultado un éxito en varios sitios destacados de la Red 2.0. Se han establecido clasificaciones aproximadas de fotografías en Flickr, de enlaces en Delicious y, quizá la más conocida, en Wikipedia, que recoge información sobre todas las áreas del conocimiento. Esta última corresponde a una enciclopedia en evolución; es, de lejos, más amplia que lo que cualquier persona o grupo medio de personas puede producir. Además, se actualiza con mayor prontitud que sus equivalentes tradicionales en papel. Ha comenzado en biología un movimiento paralelo para desarrollar un nomenclator común para genes y proteínas. El proyecto WikiProteínas, por ejemplo, potencia la anotación distribuida de las proteínas.

La clasificación genética actual procede en cuatro etapas. En primer lugar, se identifica y denomina a un gen con la mayor precisión posible de acuerdo con la información de la que se dispone en el momento del descubrimiento. Segundo, se recopilan descripciones breves de ese gen, basadas en experimentos funcionales o en la comparación de secuencias. En tercer lugar, se crean a partir de esos datos palabras clave normalizadas que se usan para agrupar en categorías a los genes. Por fin, se ordenan esas categorías en una jerarquía o en otra estructura de ordenación sistemática. En la actualidad nos hallamos en esta cuarta y

última etapa. La GO proporciona ese tipo de organización de términos funcionales.

La limitación más importante de este planteamiento procederá de su dependencia del factor humano. Para comprender hacia dónde avanza la nomenclatura genética, consideremos los distintos enfoques organizativos de los motores de búsqueda Google y Yahoo. Yahoo era en su origen un directorio administrado de forma manual, una estructura de tipo DAG concebida y revisada por personas. Los usuarios de la red proponían sitios y los administradores los incluían en varias categorías. Este método tenía sentido en los inicios, cuando el número de sitios nuevos que debían añadirse a la Red era limitado.

Sin embargo, pronto apareció la estrategia de Google, automatizada y con capacidad de acomodarse a las necesidades del sistema, que recogía las palabras clave de cada página de la red y calculaba sus relaciones de acuerdo con su patrón de enlaces. El criterio de clasificación génica utilizado por el GO guarda semejanza con el planteamiento inicial de Yahoo, pues la clasificación de los genes se basa en el estudio meticuloso, realizado por un experto, de cada nuevo espécimen. Pero una avalancha de datos nuevos puede paralizar hasta el equipo más dedicado. Este es precisamente el problema que atenaza a la biología actual.

Quizá la estrategia de gestión de la información que ha florecido en la Red ayude a superar el escollo. ¿Que sucedería si se abandonara la clasificación manual del alud de datos genómicos que inundan la bibliografía científica y dejáramos de preguntarnos si una entidad nueva o confusa debe encajar en un diagrama? En su lugar, conforme llegan los resultados, podrían contabilizarse de forma automática las semejanzas, generando una colección de tipo Google de información interconectada y entrelazada. Con este enfoque, perderíamos la reconfortante seguridad que transmiten los genes con nombres curiosos y las imágenes tranquilizadoras de la clasificación jerárquica, pero ganaríamos una comprensión mayor y más útil de la multitud de aspectos que en las entidades biológicas se asemejan y de vías en que interactúan.

Ni que decir tiene que hay una mina de proyectos de investigación que aguardan a quien siga este planteamiento. Los biólogos deberán elegir qué atributos canónicos merecen ser analizados en un experimento ambicioso. Deberán hallar la mejor manera de agrupar los genes y sus productos para dilucidar las conexiones importantes. Tales retos —en realidad oportunidades— son algunos de los frutos que la genómica aporta a la biología.

Bibliografía complementaria

COMPARING CLASSICAL PATHWAYS AND MODERN NETWORKS: TOWARDS THE DEVELOPMENT OF AN EDGE ONTOLOGY. L. J. Lu *et al*. en *Trends in Biochemical Science*, vol. 32, págs. 320-331; 2007.

THE AMBIGUOUS BOUNDARY BETWEEN GENES AND PSEUDOGENES: THE DEAD RISE UP, OR DO THEY? D. Zheng y M. B. Gerstein en *Trends in Genetics*, vol. 23, págs. 219-224; 2007.

UNCOVERING TRENDS IN GENE NAMING. M. R. Seringhaus, P. D. Cayting y M. B. Gerstein en *Genome Biology*, vol. 9, pág. 401; 2008.

MIPS: ANALYSIS AND ANNOTATION OF GENOME INFORMATION IN 2007. H. W. Mewes *et al*. en *Nucleic Acids Research*, vol. 36, págs. 196-201; 2008.

RMN portátil

Una versión portátil de las imponentes máquinas de resonancia magnética nuclear explora la química y la estructura de objetos muy dispares, de momias a neumáticos

Bernhard Blümich

CONCEPTOS BASICOS

- Desde hace decenios se vienen aplicando sistemas de resonancia magnética nuclear (RMN) para estudiar la composición química de los materiales sin dañarlos. En medicina se ha empleado la misma técnica con las máquinas de toma de imágenes por resonancia magnética (IRM) para observar el interior del cuerpo humano.
- Las máquinas de RMN y de IRM tienen un tamaño notable. Por ello se han desarrollado versiones portátiles como el RATON-RMN, que se aplica al control de procesos de fabricación, al ensayo respetuoso con las muestras, a la arqueología y a la conservación de obras de arte.
- La investigación actual podría desembocar en unas versiones mejoradas y especializadas de los dispositivos portátiles, incluido un escáner cerebral parecido a un casco de motorista que operaría en el interior de una ambulancia en marcha.

Puede que al lector o a alguna persona conocida le hayan examinado con una máquina de toma de imágenes por resonancia magnética (IRM). Permanecer tendido entre los claustrofóbicos confines de los enormes anillos magnéticos del aparato de resonancia puede resultar estresante, pero el valioso diagnóstico que avanzan las consiguientes imágenes de alto contraste de nuestros tejidos internos compensa cualquier apuro. Una versión más generalizada de esa técnica, la resonancia magnética nuclear (RMN), ofrece también grandes ventajas: permite caracterizar la composición química de los materiales, así como la estructura de proteínas y otras biomoléculas sin necesidad de penetrar en la muestra en estudio.

Desde hace años, sin embargo, médicos y científicos anhelan aparatos portátiles de RMN que puedan emplearse fuera del laboratorio. Imaginemos a personal paramédico con la cabeza cubierta con un casco equipado con un escáner de IRM que localiza coágulos de sangre en el cerebro de quien acaba de sufrir un accidente cerebrovascular, en una ambulancia que circula a toda velocidad. O expertos en arte dotados de espectroscopios portátiles de RMN que determinan la composición química de los pigmentos, lo que les permite distinguir entre cuadros auténticos y falsificaciones.

El autor y Peter Blümler, antiguo doctorando en el laboratorio del primero, dieron en 1993 los primeros pasos hacia un aparato portátil de RMN, cuando ambos trabajaban en el Instituto Max Planck de Investigación de Polímeros en Mainz. El trabajo dio como resultado un pequeño instrumento de comprobación de materiales, de gran utilidad para los investigadores de este campo. Desde entonces, la incipiente disciplina de la "RMN portátil" se ha basado en aquel planteamiento inicial y en los de otros para desarrollar una amplia gama de técnicas afines que incorporan unas capacidades analíticas y de formación de imágenes cada vez más potentes.

RMN simplificada

Hace quince años, cuando empecé con Blümler a especular —medio en broma— acerca del aparato más sencillo que pudiera generar una señal de RMN útil, la idea era, en su conjunto, ridícula. La mayoría de los investigadores se movían en sentido contrario: diseñaban protocolos de medida de RMN cada vez más complejos, que arrojaran detalles más refinados de la estructura de los objetos y la materia. Pero nuestros primeros esfuerzos en el desarrollo de técnicas de IRM para materiales poliméricos nos habían enseñado que la consecución de buenas imágenes no exigía siempre imanes costosos y voluminosos (junto con los campos uniformes, u homogéneos, que éstos creaban).

Nos percatamos de que los campos magnéticos, más débiles y no uniformes (inhomogéneos), de los imanes permanentes económicos (aunque de 20 a 50 veces más potentes que

1. EL EXAMEN DE UNA PINTURA con el RATON-RMN, un analizador de materiales portátil (*en el interior del posicionador*), permite a Eleonora Del Federico, del Instituto Pratt, discriminar entre las capas de barnices, pinturas, *gesso* y el lienzo y así establecer el estado de conservación del cuadro.

GRANT DELIN (*fotografía*); *NEW DOMESTIC DAYDREAMING* DE KENNETH BROWNE, 2007 (*pintura*)


XPS

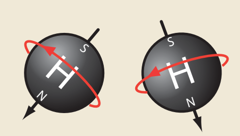
Así opera la resonancia magnética nuclear

En la técnica de la resonancia magnética nuclear (RMN), los objetos se someten a un campo magnético y a pulsos de radiofrecuencia (RF). El análisis de las respuestas del material revela la constitución molecular y las propiedades (resistencia mecánica, dureza de la sustancia, etcétera). Las grandes máquinas de toma de imágenes por resonancia magnética (IRM), habituales en los hospitales (*derecha*), corresponden a una forma de dispositivo de RMN.

Creación de la magnetización nuclear

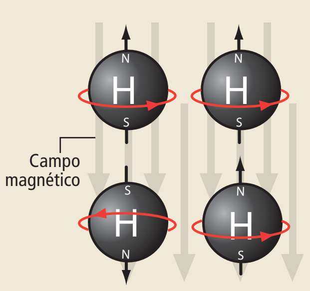
1 ORIENTACION AL AZAR





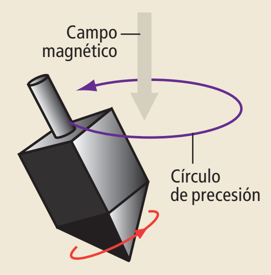
Protones sueltos (núcleos de hidrógeno) giran en torno a sus ejes orientados al azar. El movimiento de los protones dotados de carga positiva (espines) hace que los mismos se comporten como si fueran minúsculos imanes de barra.

2 LOS ESPINES MAGNETIZADOS SE ALINEAN...



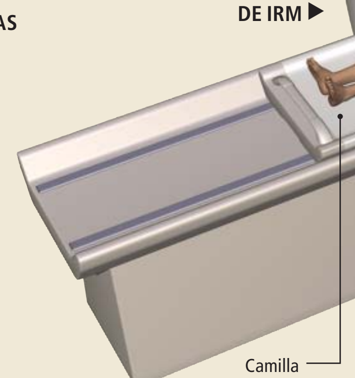
Cuando la máquina de RMN aplica un campo magnético intenso a la muestra, los espines (en promedio) tienden a colocar su eje de rotación paralelo a las líneas de campo.

3 ...Y PRECESIONAN COMO PEONZAS



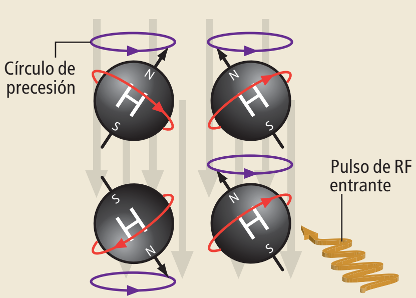
Pero la alineación no es total, por lo que aparece una precesión (los ejes rotan en torno a las líneas de campo), cuya frecuencia es característica de cada núcleo y grupo químico.

MAQUINA ESTANDAR DE IRM ▶



Absorción y liberación de energía de RF

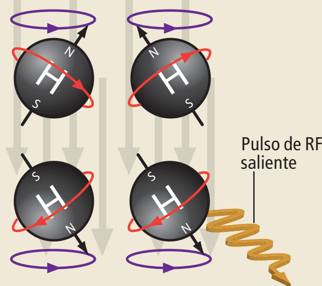
1 GRUPO DE ESPINES MAGNETIZADOS



En el seno del campo magnético, los espines magnéticos precesionan según orientaciones aleatorias. Cuando una bobina de la máquina de RMN envía un pulso de RF hacia el grupo, sólo el espín cuya velocidad y fase coinciden con las del pulso absorbe la energía de éste.

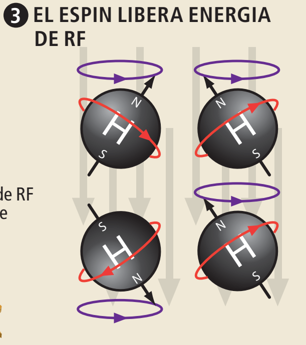
2 EL ESPIN ABSORBE ENERGIA DE RF





La absorción hace que el espín gire 180 grados. Todos los núcleos que interactúan de igual modo con el pulso de RF absorben energía de éste y rotan 180 grados. La bobina de la máquina capta la señal inducida por la magnetización causada por esos cambios en la precesión de los espines y la envía a un ordenador.

3 EL ESPIN LIBERA ENERGIA DE RF



A intervalos aleatorios, los espines girados liberan la energía de RF absorbida y retornan a su orientación original (previa al pulso).

Resultados ▶

El ordenador registra el tiempo que tarda cada tipo de espín en liberar la radioenergía absorbida (*gráfica* T_1). El sistema monitoriza también el proceso de desincronización aleatoria de los espines (*gráfica* T_2). Registra la frecuencia de precesión de los espines de los distintos grupos químicos, que se resume en un valor llamado desplazamiento químico. El desplazamiento constituye la base de los espectros de RMN que identifican los grupos químicos constituyentes de una muestra, tales como los de la molécula de tolueno, un hidrocarburo (*gráfica de análisis químico*). En las máquinas de IRM se combina toda esa información de RMN para generar imágenes de los tejidos internos, incluido el cerebro.

MORIEL NESSAIVER, www.simplyphysics.com (*núcleos de hidrógeno*); LUCY READING-IKKANDA (*gráficas*); GEORGE RETSECK (*MRI*)

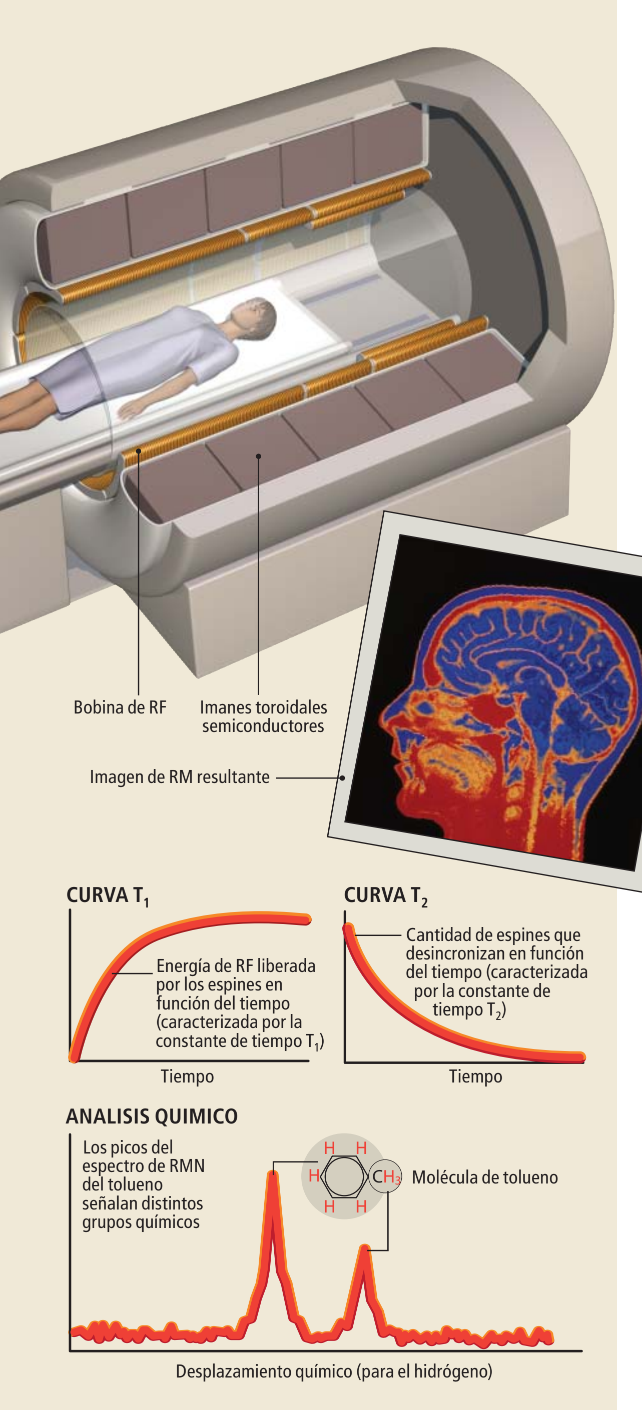
los que adornan nuestro frigorífico) generaban datos que discriminaban entre distintas zonas de materia blanda. Blümler no tardó en proponer el diseño de un dispositivo que produciría la información básica contenida en un píxel de una imagen estándar de resonancia magnética. Al pensar que podríamos moverlo como si se tratara de un ratón de ordenador, le dimos el nombre de NMR-MOUSE (de "nuclear magnetic resonance mobile universal surface explorer", explorador universal de superficies por resonancia magnética nuclear), o sea, RATON-RMN.

El aspecto más fascinante del invento era que prometía ser tan pequeño como una taza de café, lo que facilitaría su manejo. Y a diferencia de la RMN al uso, donde las muestras no pueden sobrepasar el diámetro interior de los imanes toroidales que emplea, el nuevo aparato podría situarse en la superficie de un objeto de cualquier tamaño para reconocer su interior.

Sin embargo, la inhomogeneidad del campo magnético del RATON-RMN constituía un grave problema. Según los textos de la época, por su culpa no había posibilidad de utilizar el aparato para el análisis químico de materiales.

RMN estándar

Para salvar el escollo, aprovechamos una medida específica de la RMN estándar: la constante de tiempo T_2. En la actualidad, la espectroscopía de RMN clásica de alta resolución se



ejecuta colocando la muestra en el interior de un imán estático de gran tamaño que genera un campo magnético intenso y uniforme. La técnica se basa en los núcleos atómicos de ciertos átomos; se trata de paquetes de protones dotados de carga eléctrica positiva y neutrones sin carga, que giran sobre su eje a modo de diminutas peonzas; al seguir ese movimiento, se comportan al modo de minúsculas barras imantadas con polos norte y sur.

En el seno de un campo magnético intenso, los imanes de barra giratorios tratan de alinearse con las líneas del campo magnético. Pero no logran un alineamiento paralelo cabal: los núcleos giratorios, o espines, se bambolean (precesionan) en torno a las líneas de fuerza del campo magnético; lo mismo que una peonza cuando se le aplica una fuerza transversal.

Si sobre los núcleos incide entonces un pulso de energía de radiofrecuencia (RF), absorben y luego reemiten energía a una frecuencia específica, que depende de la velocidad de rotación de cada uno. Esas frecuencias originan un espectro de RMN en forma de picos de altura distinta, que, como una huella dactilar, sirve para identificar los grupos químicos constituyentes. A partir de esos datos se obtienen imágenes que permiten discriminar entre materiales.

La espectroscopía de RMN se basa en la medida de las frecuencias de precesión de los espines cuando éstos responden al campo magnético aplicado y a los pulsos de radiofrecuencia. Cuando una muestra no magnetizada se expone a un campo magnético, los espines se alinean de forma aproximada con el campo. Tras aplicar un pulso de RF (procedente de una bobina de RF), los espines precesionan primero en sincronía, para luego perderla y retornar a su estado inicial. Ese retorno al equilibrio tarda un tiempo característico T_1, durante el cual los espines liberan la energía que han absorbido del pulso de RF. (El tiempo característico, o constante de tiempo, guarda semejanza con el período de semidesintegración: el tiempo que tarda en reducirse a la mitad el nivel de las emisiones por desintegración nuclear en una muestra dada.)

La precesión síncrona de los espines magnéticos induce en la bobina un voltaje oscilante, que se amortigua con una constante de tiempo T_2 característica de cada tipo de espín a medida que éstos se van alejando de la sincronía. Para crear espectros de RMN que revelen la composición química de una sustancia y para producir imágenes, los tiempos T_1 y T_2, así como los datos de precesión se conjugan en fórmulas matemáticas, varias y complejas, que —valga el ejemplo— deducen la densidad de espines en un volumen de muestra, a partir de la cual se obtiene el contraste de la imagen de un objeto.

Tren de ecos

Para conseguir nuestro propósito resultó clave percatarnos de la posibilidad de medir T_2 en campos magnéticos no uniformes. Ya en 1949, Erwin L. Hahn, de la Universidad de Illinois, había demostrado que las respuestas a los estímulos de RMN eran detectables incluso cuando se empleaban campos magnéticos no uniformes, merced a la generación de ecos. En esos campos no uniformes, el voltaje en la bobina debido a la excitación del pulso de

PIONEROS DE LA RMN PORTATIL

La incipiente técnica de la "RMN móvil" debe sus avances a investigadores de los cuatro puntos cardinales. Traemos aquí a los más destacados:

PAUL CALLAGHAN
Universidad de Victoria en Wellington
Se le deben innovaciones en microscopía de RMN, el desarrollo de métodos de RMN para el estudio molecular de materiales blandos y porosos y la invención de aparatos portátiles de espectrometría de RMN.

EIICHI FUKUSHIMA
New Mexico Resonance, Alburquerque
Ha creado métodos de análisis de procesos técnicos por RMN y desarrollado nuevas técnicas de RMN móvil.

ALEXANDER PINES
Universidad de California en Berkeley
Se le deben múltiples avances en la metodología de la RMN, incluidas RMN de estado sólido y técnicas de RMN para amplificar las señales mediante efectos de hiperpolarización.

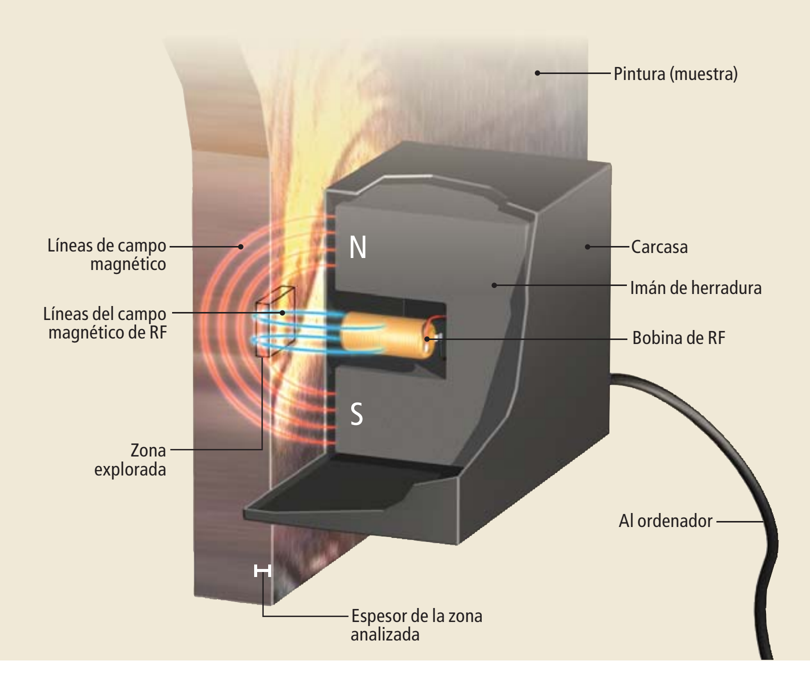
2. LA SONDA PORTATIL DE RMN (*derecha*) desarrollada por Paul Callaghan (*izquierda, sosteniendo la perforadora*), Mark Hunter y otros investigadores se hizo descender por una perforación para analizar las propiedades del hielo Antártico.



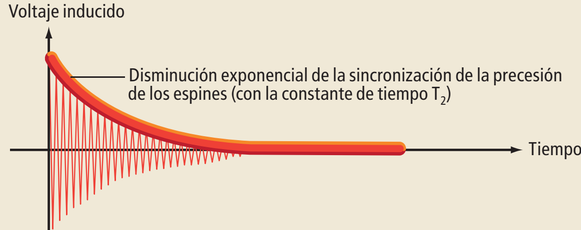
MEHAU KULYK SPL/Photo Researchers, Inc. (imagen de MRI); CORTESIA DE PAUL CALLAGHAN (investigadores)

Primera máquina miniaturizada de RMN

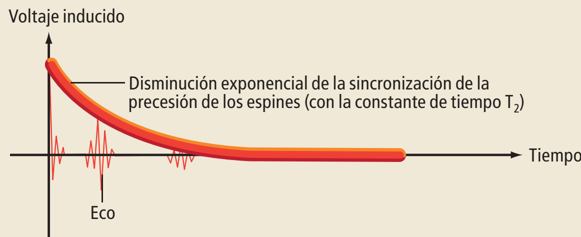
El analizador portátil de materiales, el RATON-RMN (sección), consiste en un imán de herradura con una bobina de radiofrecuencia (RF) en el intersticio. El instrumento analiza la composición de la materia en los puntos donde se cruzan las líneas del campo magnético del imán y de la bobina de RF. El operador sitúa el aparato a varias distancias para analizar capas a distintas profundidades.



Máquina estándar de RMN: campo magnético uniforme



RATON-RMN: campo magnético no uniforme



▲ **DIFERENCIAS ENTRE LA RMN ESTANDAR Y LA MOVIL**
Una máquina estándar de RMN genera un campo magnético uniforme; ello le permite crear una señal de T_2 con un solo pulso de RF. El RATON-RMN, en cambio, se muestra incapaz de hacerlo porque emplea un campo magnético no uniforme; sí reacciona, en cambio, con una señal de T_2, mediante la excitación de las muestras con múltiples pulsos de RF que crean ecos. Las amplitudes de estas señales, de los ecos, se ensamblan entonces en una señal de T_2 útil.

GEORGE RETSECK

RF disminuye rápidamente hasta cero, pero se recupera después mediante la aplicación de un segundo impulso. La aplicación de pulsos adicionales genera una serie de ecos que forman lo que técnicamente se denomina un tren de ecos. La amplitud de los ecos disminuye con el tiempo de relajación T_2, parámetro característico de cada material.

El valor T_2 refleja la movilidad de las moléculas analizadas: la materia blanda (donde las moléculas se mueven con facilidad) presenta un T_2 largo; la materia dura (donde la movilidad molecular es menor), un T_2 corto. Siempre que tiene lugar una reacción química o una transición de fase, varía también la movilidad molecular de los constituyentes. Los valores de T_2 ofrecen información acerca de la física y la química de un material, así como datos de contraste que se emplean para diferenciar en las imágenes clínicas zonas de tejidos disímiles.

Cuando, en 1994, Blümler y el autor se trasladaron a la Universidad RWTH de Aquisgrán, acometimos la construcción de la primera versión de nuestro RATON-RMN. Dos años después, observábamos la primera señal generada por el instrumento, asombrados de que éste operara sobre casi cualquier sustancia que contuviera protones, incluidos la madera, el caucho y el chocolate. Para algunos materiales, los trenes de ecos eran muy largos; para otros, cortos. Empezamos a investigar el modo en que se correlacionaba T_2 con las propiedades de los materiales sometidos a examen.

Tras varios años de mejoras y merced a las aportaciones cruciales de Federico Casanova y Juan Perlo, que se unieron al grupo RTWH, logramos la configuración de tamaño monedero del RATON-RMN, que empleamos hoy. Consta de una sola cara, el campo magnético se extiende hacia fuera desde el imán y consume muy poco (como una bombilla incandescente). En todo el mundo hay de 40 a 50 unidades en servicio.

Uso del RATON-RMN

Uno de los primeros materiales que estudiamos fue el caucho. Por un lado, se trata de una sustancia de gran importancia comercial para productos como los neumáticos; por otro, es blando como los tejidos corporales con los que la técnica de IRM da óptimos resultados. El caucho se compone de largas moléculas poliméricas que se entrecruzan de forma aleatoria en una red tridimensional. En numero-

El autor

Bernhard Blümich enseña química macromolecular en la Universidad RWTH de Aquisgrán. Estudia el desarrollo y la aplicación de la espectroscopía y formación de imágenes por RMN en ciencia de los materiales e ingeniería química. Se doctoró en 1981 en la Universidad Politécnica de Berlín.

sas aplicaciones, la densidad de esos enlaces cruzados es la característica más importante para la determinación de la rigidez global. Las prestaciones de un neumático, que consta de múltiples capas de compuestos del caucho de diversa composición química y dispar densidad de enlaces cruzados, depende de la interacción entre todos los componentes mencionados. Los ensayos en pista son siempre necesarios para determinar el comportamiento de un nuevo diseño. Resultó, sin embargo, que el RATON-RMN podía analizar la densidad de enlaces cruzados de las capas de cada producto acabado, uno a uno, y sin destruir el neumático. Tal posibilidad eliminó también la necesidad de algunas pruebas en pista.

El RATON-RMN llega a capas situadas a distintas profundidades, hasta una distancia de pocos centímetros. Sus campos magnéticos generan la señal de RMN sólo en puntos determinados a cierta distancia del instrumento, lo que obliga a los investigadores a desplazar esa zona sensible de un lado a otro de las capas del neumático para obtener lecturas de T_2 (y, por tanto, de densidades de enlaces cruzados) para cada capa. Otros usos similares del RATON-RMN incluyen el análisis del grado de degeneración ambiental que se inflige a los polímeros (incluidos el caucho y el polietileno) y de la composición química de los aglutinantes de las pinturas al temple de los maestros antiguos.

Otra aplicación clave gira en torno a la generación de los perfiles internos de materiales existentes bajo la piel humana o bajo capas de suciedad, barniz y pinturas de retoque de cuadros antiguos. Hace pocos años aplicamos nuestra técnica de reconocimiento a Ötzi, el Hombre del Hielo, la momia neolítica que hallaron unos alpinistas en 1991 cuando los glaciares fronterizos entre Austria e Italia se fundieron y el cuerpo quedó al descubierto. Obtuvimos un perfil nítido en profundidad que muestra una capa de hielo, una capa correspondiente a la epidermis liofilizada y a un tejido subcutáneo de Ötzi, y una capa densa y esponjosa correspondiente a la estructura ósea interior. Tal visualización no destructiva de huesos podría resultar muy valiosa para los arqueólogos, en su búsqueda de restos recónditos, enterrados e intactos de ADN prehistórico.

Las aplicaciones de los instrumentos portátiles de RMN se multiplican a medida que se avanza en el desarrollo de la técnica. Un ejemplo destacado son las labores de Magritek, empresa neozelandesa radicada en Wellington, de la que es cofundador Paul Callaghan, uno de los primeros investigadores sobre RMN. Entre otras actividades, Magritek aplica una técnica (afín a la nuestra) al análisis de la variación de las propiedades mecánicas de los núcleos del hielo antártico, conforme los glaciares de aquella región se enfrentan con los efectos del calentamiento global.

Otras aplicaciones del RATON-RMN

Además del examen de pinturas, el RATON-RMN ha encontrado aplicaciones en la ciencia básica y en la industria. Los fabricantes de neumáticos de automóvil lo emplean para tomar imágenes y determinar la composición química de las capas de compuestos del caucho de que consta un neumático (en algunos casos, producto de la competencia). Una máquina estándar de tomografía por RMN no funcionaría, por ejemplo, con un neumático de banda de acero, pues su intenso campo magnético atraería a la banda, cuya naturaleza ferrosa arruinaría los resultados. Otros lo emplean para evaluar los daños ambientales que sufren con el paso de los años los materiales poliméricos como el polietileno. También se ha empleado el RATON-RMN para estudiar a Ötzi, el Hombre del Hielo, la momia parcialmente descongelada que unos escaladores hallaron en los Alpes en 1991. En 2006, se utilizó el aparato para analizar una sección transversal de la piel, los tejidos subcutáneos y el cráneo del Hombre del Hielo en el Museo de Arqueología de Bolzano.

ÖTZI EL HOMBRE DEL HIELO (*izquierda*) y los neumáticos de automóvil (*arriba*) ilustran dos de los muchos tipos de materiales aptos para el estudio con el RATON-RMN.

THE BRIDGEMAN ART LIBRARY/GETTY IMAGES (*El Hombre de los Hielos*); RYAN MCVAY *Getty Images* (*neumático*)

Avances en RMN portátil

En fecha reciente, Casanova y Perlo han aumentado la uniformidad del campo magnético del imán permanente para mejorar la resolución del sistema. El RATON-RMN avanzado revela la química de una solución contenida en un vaso ancho colocado encima del aparato. Esta sorprendente capacidad ha abierto la puerta a los químicos para que apliquen el RATON-RMN al análisis molecular. Los investigadores están estudiando distintas configuraciones de imanes que darían lugar a unos instrumentos de RMN del tamaño de una taza de café, preparados para realizar ensayos químicos.

Puesto que las piezas que se necesitan son las de un teléfono celular combinadas con un pequeño imán, el precio del instrumento bajaría al aumentar la demanda. En un futuro, podrían venderse en las grandes superficies incluso aparatos de RMN de uso personal. Alguien que sufriera una afección cutánea podría realizar el seguimiento de la misma en su aparato doméstico de RMN y ajustar el tratamiento dermatológico de acuerdo con los resultados.

Bibliografía complementaria

THE NMR-MOUSE, A MOBILE UNIVERSAL SURFACE EXPLORER. G. Eidmann, R. Savelsberg, Peter Blümler y Bernhard Blümlich en *Journal of Magnetic Resonance, Series A*, vol. 122, n.º 1, págs. 104-109; septiembre, 1996.

WELL LOGGING. R. L. Kleinberg en *Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance*, vol. 8. Dirigida por David M. Grant y R. K. Harris. Wiley, 1996.

NMR LOGGING PRINCIPLES AND APPLICATIONS. George R. Coates, Lizhi Xiao y Manfred G. Prammar. Halliburton Energy Services, 1999.

ESSENTIAL NMR. Bernhard Blümlich. Springer, 2005.

MOBILE SINGLE-SIDED NMR. Bernhard Blümlich, Federico Casanova y Juan Perlo en *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, vol. 52, n.º 4, págs. 197-269; 14 de abril, 2008.

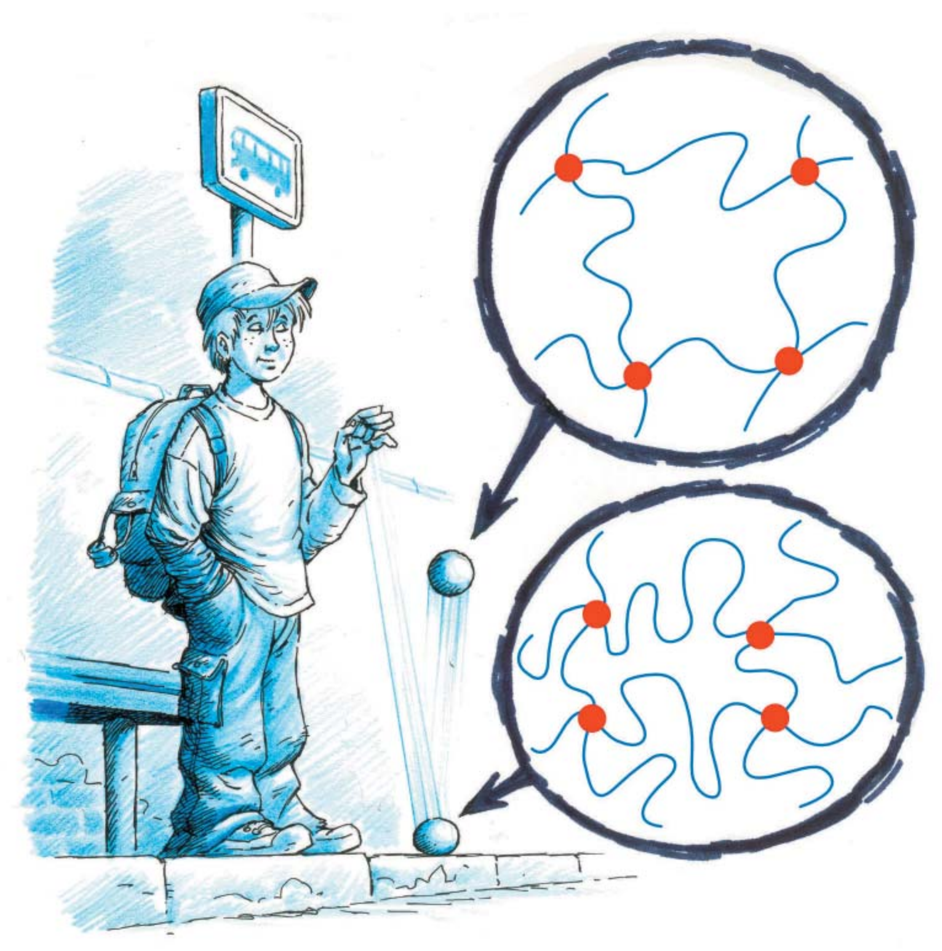
Rebote o rotura

El resultado de un choque es un rebote, una deformación o una fractura. Todo depende de la estructura íntima de los materiales que intervienen en la colisión

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Contentísimo con su nueva "superbola", el niño la lanza con fuerza contra la pared de la cocina. El rebote le sorprende tanto, que no puede atraparla y la bola se aleja a toda velocidad. ¿Cuál será el resultado del próximo impacto? ¿Otro rebote, un cristal roto, una lata de conservas abollada?

Para predecirlo, hay que conocer el comportamiento microscópico de los materiales que intervienen. Durante el choque, se ejercen unas intensas fuerzas entre bola y obstáculo que comprimen los materiales componentes. ¿Qué ocurre a escala microscópica? Los sólidos están formados por átomos vinculados mediante interacciones diversas: los "enlaces". Si las fuerzas que sufren los átomos son débiles, esos enlaces se comportan como pequeños muelles: se alargan o se acortan, y tienden a devolver a los átomos a sus posiciones iniciales. Según los materiales, los enlaces son más o menos fuertes y más o menos numerosos. Un material polimérico como el caucho (natural o sintético) está constituidos por largas cadenas de átomos, cada una de las cuales se comporta como un elástico: se alarga y se acorta fácilmente. La cohesión del caucho está asegurada por los puentes moleculares tendidos entre las cadenas. Como esos puentes no son muy numerosos, a nuestra escala la elasticidad se conserva y el caucho constituye un material idóneo para hacer bolas que reboten mucho (*figura 1*).



1. Las largas cadenas poliméricas que componen el caucho son elásticas. Como los muelles, se comprimen en el momento del impacto y luego se relajan. La cohesión del material está asegurada por los enlaces químicos que unen las cadenas: cuanto más numerosos son esos enlaces, tanto menor es la elasticidad.

BRUNO VACARO/*PLS*

Elástico como la bola saltarina

Durante el impacto, a medida que la bola pierde velocidad, los muelles microscópicos se comprimen y almacenan la energía. En cuanto la bola se para, los muelles se distienden y la aceleran en sentido contrario. Durante la colisión, los contactos entre átomos no vecinos de una misma cadena generan un frotamiento interno, que disipa una parte de la energía del choque en forma de calor (agitación desordenada de los átomos). Para los mejores cauchos, la bola parte tras el choque con el 90 por ciento de la energía que poseía antes del choque. El diez por ciento que falta se ha convertido en calor: si la soltamos desde una altura de dos metros, la bola rebotará hasta 1,80 metros. La energía perdida en este caso, cerca de dos joule por kilogramo de materia, eleva la temperatura en algunas centésimas de grado. Muy débil, el efecto se hace perceptible si los choques se repiten o si la bola es menos elástica. Los jugadores de *squash* son testigos de ello: al cabo de algunos minutos de juego, la pelota se calienta un poco y rebota de un modo distinto.

Si la energía de la colisión es escasa, todos los materiales serán más o menos elásticos. Más allá de cierto umbral, los enlaces pueden romperse. Esa rotura no se produce durante la compresión debida al choque, sino durante la descompresión que sigue. En efecto, a causa de la repulsión entre sus nubes electrónicas, los átomos apenas se interpenetran. In-



2. En los choques débiles, casi todos los materiales son elásticos (*derecha*). Con choques más violentos (*izquierda*), el vidrio se quiebra: en este material de estructura rígida, una energía modesta basta para romper los enlaces entre los átomos a lo largo de una fisura. Un metal, por su parte, se deformaría. El mar electrónico donde están inmersos los iones metálicos confiere plasticidad, pues los vínculos que cohesionan el material no se rompen, se desplazan.

cluso cuando se oprimen fuertemente dos átomos contiguos, su distancia se modifica poco. En cambio, bajo tracción los átomos pueden separarse irreversiblemente: el enlace se rompe. Este hecho a escala microscópica no se manifiesta inmediatamente a nuestra escala, aunque si sabemos que los materiales tenidos por frágiles (ladrillo, vidrio, etcétera) soportan presiones elevadas. La textura del material (homogéneo o formado por gránulos micrométricos) y la presencia de defectos (cavidades, inclusiones, etcétera) son factores importantes. La experiencia revela, empero, dos grandes clases de materiales: los frágiles, que se quiebran como el vidrio, y los dúctiles, que se deforman como el aluminio (*figura 2*).

Fijémonos en el vidrio. Su rotura por choque se produce según unas superficies que se muestran lisas, como si se hubiesen exfoliado. Dado el carácter regular de tales superficies, el número de enlaces rotos es mínimo con respecto al total de enlaces presentes en el volumen del material; o sea, romper el vidrio requiere poca energía. Esa es la razón de que baste con que un objeto de vidrio caiga de una pequeña altura para que se rompa. La fractura se facilita si el vidrio ya ha sufrido choques, porque éstos crean microgrietas superficiales de micras de diámetro, que sirven de iniciadoras de grietas más extensas y más profundas. Por ello, el vidrio se muestra mucho más resistente inmediatamente después de fabricado que al cabo de un tiempo de utilización. En cambio, una botella en la que hubiésemos estado agitando guijarros sería de una fragilidad extrema.

Frágil como el vidrio, dúctil como el aluminio

El caso de los metales es muy distinto. En un metal, los electrones más externos de los átomos son casi libres. Esos átomos forman un "mar", donde están inmersos los iones metálicos, que asegura la cohesión del metal. Los metales son maleables, pues el mar electrónico, muy móvil, se adapta a la redistribución de los iones durante el choque. Los enlaces se desplazan en vez de romperse. A nuestra escala, el material es plástico: no se rompe, pero después del impacto no recupera su forma anterior. Como el número de enlaces apenas varía, la energía que interviene en las pequeñas deformaciones es notablemente inferior a la energía necesaria para la rotura por exfoliación. Así, el granizo de tamaño medio abolla la chapa del coche y rebota en el parabrisas sin dañarlo. Sin embargo, la energía de deformación no es nula: la reorganización de los enlaces gasta energía, que se disipa en calor.

Los metales dúctiles pueden estirarse de modo espectacular. Pero si se los estiran aún más, las tensiones originan y hacen crecer cavidades en torno a los defectos del material. Esas cavidades acaban uniéndose entre sí y el metal se parte a lo largo de una superficie de aspecto alveolar. Como a esa rotura se llega tras una transformación que afecta a todo el volumen del material, la energía requerida es considerable. Esa es la razón por la que una cacerola de cobre o una lata de cerveza no se rompen al caerse, e incluso de que el granizo más pesado no perfore la chapa del coche mientras hace añicos el parabrisas. Un caso extremo de material dúctil es el plomo. Una bala de plomo que incide en un obstáculo no rebota, sino que se aplasta sin quebrarse.

La distinción frágil/dúctil no es inmutable. El comportamiento de los materiales varía con la temperatura. Llevados a bajas temperaturas, los metales (e incluso las bolas que rebotan mucho) se vuelven frágiles y quebradizos. Este era el caso de ciertos aceros de baja calidad empleados hasta los años cincuenta del pasado siglo, que se tornaban quebradizos cuando la temperatura descendía hasta algunos grados bajo cero. Ese defecto fue el origen de algunos accidentes espectaculares, como las embarcaciones que se partían de golpe bajo fríos extremos. En ello vieron algunos la causa de la rapidez del naufragio del *Titanic*. En vez de desgarrar el casco y crear una vía de agua moderada, el iceberg lo habría roto, dada su fragilidad a causa del frío, y abierto una gran brecha.

BRUNO VACARO/PLS

¿Cuán difícil es el problema lógico más difícil de la historia?

Cómo extraer información de ciertas respuestas aleatorias para resolver el problema de los tres dioses en tan sólo dos preguntas

Gabriel Uzquiano

Recordemos el "problema lógico más difícil de la historia", tal y como lo enunció George Boolos:

Hay tres dioses A, B *y* C. *Uno siempre dice la verdad, uno siempre miente y otro responde de manera completamente aleatoria. Nuestra tarea consiste en determinar las identidades de* A, B *y* C *por medio de no más de tres preguntas cuya respuesta deba ser "sí" o "no". Cada pregunta debe dirigirse a un dios. Aunque cada uno de los dioses entiende el castellano, van a responder en su propia lengua con una de las palabras 'da' o 'ja', que significan "sí" o "no". Desafortunadamente, no sabemos qué palabra significa "sí" y qué palabra significa "no".*

¿Es posible resolver este problema por medio de tan sólo dos preguntas? Parecería que no. Como hay tres dioses, *A*, *B* y *C*, debemos distinguir al menos seis posibilidades diferentes: VMA, VAM, AVM, AMV, MVA, MAV. Aunque se dignaran a responder en castellano, una respuesta de "sí" o "no" tan sólo podría eliminar la mitad de las posibilidades que permanecen en juego en cada ocasión. Parece, pues, que con dos preguntas no podríamos resolver un problema que contara con más de cuatro posibilidades iniciales.

Tal como reseñaba Juan Parrondo en estas mismas páginas, B. Rabern y L. Rabern han resuelto por medio de tan sólo dos preguntas una simplificación del problema de los tres dioses en el que parten también con seis posibilidades iniciales. ¿Cómo es eso posible? Aunque el argumento anterior resulta inapelable siempre que nos limitemos a hacer preguntas que los dioses contesten por medio de un "sí" o "no", la situación cambia cuando admitimos preguntas que un dios no se encuentre en disposición de responder. El enunciado del problema sólo dice que debemos hacer preguntas cuya respuesta sea "sí" o "no", no que debamos restringirnos a preguntas que los dioses se encuentren en disposición de responder. La clave para optimizar la resolución del problema más difícil de la historia consiste en tomar en cuenta tales preguntas.

Veamos un ejemplo. Concluimos la columna de enero con el siguiente problema de Tim Roberts:

Hay tres dioses, A, B *y* C. *Uno dice siempre la verdad o siempre miente, pero no sabemos qué. Los dos dioses restantes responden de manera completamente aleatoria. ¿Podríamos determinar el comportamiento de cada dios en sólo tres preguntas cuya respuesta sea "sí" o "no"? Como siempre, aunque los dioses entienden el castellano, van a responder en su propia lengua con una de las palabras 'da' o 'ja' que significan "sí" o "no". Desafortunadamente, no sabemos qué palabra significa "sí" y qué palabra significa "no".*

Conviene de nuevo separar dos dificultades diferentes a la hora de resolver este problema. Un primer problema consiste en identificar al único dios no aleatorio. El segundo problema consiste en recabar información a partir de las respuestas de este último. Como vimos una resolución general a este problema en el artículo de enero, me limitaré a un breve recordatorio. Bastaba con notar que tanto un dios que siempre dice la verdad como uno que siempre miente responderían "sí" a la pregunta "¿Responderías "sí" a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?" y responderían "no" a la pregunta "¿Responderías "no" a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?" si y sólo si Dushanbe se encuentra en Kirguistán.

Para averiguar la respuesta a cierta pregunta, por ejemplo si se encuentra Dushanbe en Kirguistán, podemos preguntar lo siguiente:

¿Responderías "da" a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Sea cual sea el significado de 'da', un dios no aleatorio responderá "da" a esta pregunta, si y sólo si Dushanbe se encuentra en Kirguistán y "ja" si Dushanbe no se encuentra en Kirguistán.

Mucho más difícil es la tarea de identificar al dios no aleatorio. A primera vista, parecería que una respuesta de "ja" o "da" a una pregunta dirigida a un dios aleatorio podría no proporcionar información alguna y, a diferencia del problema de Boolos, no parece haber ninguna garantía de que podamos identificar a un dios no aleatorio tras una sola pregunta. ¿Qué hacer? Tal vez convenga preguntarse que ocurriría si le planteáramos a un dios no aleatorio la siguiente pregunta:

¿Respondería otro dios "da" a la pregunta de si París se encuentra en Francia?

Un dios no aleatorio no podría responder a esta pregunta, a menos que tuviera la certeza de que la respuesta correcta a esta pregunta iba a ser "sí" o "no" para entonces obrar en consecuencia. Pero como los dioses restantes se comportan de manera completamente aleatoria, nuestro dios nunca va a poder tener esa certeza y debería, por tanto, abstenerse de responder "ja" o "da" a nuestra pregunta. Esta observación es la que vamos a utilizar para resolver el problema. Al fin y al cabo, sabemos que un dios aleatorio respondería "da" o "ja" de manera completamente aleatoria.

Ahora ya nos encontramos en disposición de averiguar el comportamiento de *A*, *B* y *C* en no más de tres preguntas. Empecemos con la siguiente pregunta:

(1) Dirigida a *A*:

¿Responderías lo mismo que *B* a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Si *A* es aleatorio, entonces responderá "da" o "ja" de manera aleatoria. Si no lo es, entonces *B* y *C* deben ser aleatorios y *A* no puede tener la certeza de estar diciendo la verdad o mintiendo por medio de una respuesta de "da" o "ja". Se sigue que *A* es aleatorio si y sólo si responde "da" o "ja" a esta pregunta.

Si *A* responde "da" o "ja", preguntaremos (2). Si no obtenemos respuesta, entonces sabremos que *B* y *C* son aleatorios y preguntaremos (3) para averiguar la identidad de *A*.

(2) Dirigida a *B*:





¿Responderías lo mismo que *A* a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Sabemos, por el mismo razonamiento, que *B* es aleatorio si y sólo si responde "da" o "ja" a esta pregunta. Si responde "da" o "ja", entonces, dado que *A* es aleatorio, sabremos que *C* no lo es. Si no obtenemos respuesta, entonces el propio *B* es el dios no aleatorio.

Tras las primeras dos preguntas, podremos estar seguros de haber identificado a un dios no aleatorio. Nos queda una última pregunta, que dirigiremos a este último:

(3) Dirigida al dios no aleatorio:

¿Responderías "da" a la pregunta de si siempre dices la verdad?

Si responde "da", entonces dice siempre la verdad. Si responde "ja", entonces siempre miente.

Ha llegado por fin el momento de resolver "el problema más difícil de la historia" con tan sólo dos preguntas. Empecemos con esta simplificación del problema:

Hay tres dioses A, B y C. Uno siempre dice la verdad, otro siempre miente y otro responde de manera completamente aleatoria. Nuestra tarea consiste en determinar las identidades de A, B y C por medio de no más de dos preguntas cuya respuesta deba ser "sí" o "no"; cada una de las preguntas sea dirigida a un dios.

Hagamos primero esta pregunta:

(1) Dirigida a *A*:

¿Responderías lo mismo que *B* a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Hay tres posibilidades:

(a) No obtenemos respuesta alguna. Ello sólo puede ocurrir si *B* es el dios aleatorio y *A* es el dios de la verdad o el dios de la mentira, con lo cual no se encuentra en disposición de responder a la pregunta.

(b) *A* responde que sí a nuestra pregunta. Hay dos opciones:

(i) *A* es aleatorio y ha respondido de manera completamente aleatoria.

(ii) Ni *A* ni *B* son aleatorios, en cuyo caso *A* miente cuando dice que responderían lo mismo a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán; no lo harían. En ese caso, *B* debe ser el dios de la verdad y *C* el dios aleatorio.

(c) *A* responde que no a nuestra pregunta. Hay dos opciones:

(i) *A* es aleatorio y ha respondido de manera completamente aleatoria.

(ii) Ni *A* ni *B* son aleatorios en cuyo caso *A* dice la verdad cuando dice que responderían lo mismo a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán. En ese caso, *B* debe ser el dios de la mentira y *C* el dios aleatorio.

Sea cual sea la respuesta a la pregunta, habremos identificado a un dios no aleatorio: *A,* si no obtenemos respuesta alguna; *B,* si obtenemos "sí" o "no" como respuesta. Ahora basta con una pregunta más a aquel de los dioses *A* o *B* del que sepamos que no es aleatorio.

(2) Dirigida a aquel de los dioses *A* o *B* del que sepamos que no es aleatorio:

¿Responderías lo mismo que *C* a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Hay tres posibilidades:

(a) No obtenemos respuesta alguna. Ello sólo puede ocurrir si *C* es el dios aleatorio, ya que sabemos que hemos preguntado a un dios no aleatorio. En ese caso, podemos eliminar la posibilidad de que *A* sea aleatorio y basta examinar las respuestas que *A* dio a nuestra primera pregunta para averiguar tanto su propia identidad como la de *B*. Si *A* respondió "sí" a (1), entonces *A* es el dios de la mentira y *B* es el dios de la verdad. Si respondió "no", entonces *A* es el dios de la verdad y *B* es el dios de la mentira.

Quedan dos posibilidades:

(b) Nuestro interlocutor responde que sí a nuestra pregunta. Como sabemos que nuestro interlocutor no es aleatorio, *C* tampoco lo es. Pero entonces uno es el dios de la verdad y el otro el dios de la mentira. Como nuestro dios ha respondido que sí a nuestra pregunta, sabemos que miente y que *C* es el dios de la verdad.

(c) Nuestro interlocutor responde que no a nuestra pregunta. Como sabemos que nuestro interlocutor no es aleatorio, *C* tampoco lo es. Pero entonces uno es el dios de la verdad y el otro el dios de la mentira. Como nuestro dios ha respondido que no a nuestra pregunta, sabemos que dice la verdad y que *C* es el dios de la mentira.

Para resolver el problema lógico más difícil de la historia en tan sólo dos preguntas, basta con utilizar la técnica que introdujimos en la contribución de enero y preguntar:

(1) Dirigida a *A*:

¿Responderías "da" a la pregunta de si responderías con la palabra que significa "sí" en tu lengua a la pregunta de si responderías lo mismo que *B* a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

(2) Dirigida a aquel de los dioses *A* o *B* que sepamos no es aleatorio:

¿Responderías "da" a la pregunta de si responderías con la palabra que significa "sí" en tu lengua a la pregunta de si responderías lo mismo que *C* a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán?

Tal vez merezca la pena comparar nuestra solución con la solución de B. Rabern y L. Rabern brevemente reseñada por Juan Parrondo en estas mismas páginas. La diferencia principal radica en que el problema que ellos resuelven asume que el dios aleatorio decide a priori, aunque de manera aleatoria, si va a mentir o decir la verdad en respuesta a la pregunta que se le plantea, lo cual trivializa el problema, ya que, si sabemos a priori que el dios aleatorio va a mentir o decir la verdad en respuesta a nuestras preguntas, entonces podemos utilizar la estrategia habitual para extraer información tal y como lo hacemos con el dios de la verdad o el de la mentira, es decir, sabemos que responderá "da" a la pregunta de si respondería "da" a la pregunta de si Dushanbe se encuentra en Kirguistán si y sólo si Dushanbe se encuentra en Kirguistán.

La solución que hemos presentado no sólo no presume que el dios aleatorio decide a priori si mentir o decir la verdad, sino que exige que el proceso por medio del cual este dios responde a nuestras preguntas sea completamente aleatorio, de modo que no podemos utilizar la técnica de la columna de enero para extraer información alguna de sus respuestas.

¿Quiere saber más?

B. Rabern y L. Rabern discuten si es posible optimizar la solución de Boolos en "A Simple Solution to the Hardest Logic Puzzle Ever", en *Analysis*, vol. 68, págs. 105-112. Prepublicación en http://www.nottingham.ac.uk/journals/analysis/preprints/RABERN%20&%20RABERN.pdfde 2008.

Hornos de microondas

Cena y espectáculo

Mark Fischetti

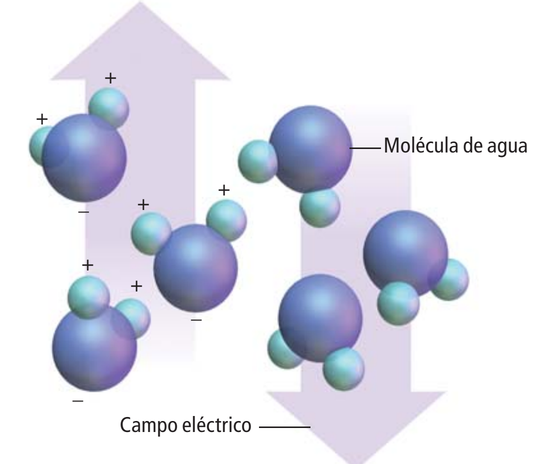
De vez en cuando agrada recordar cuán extraordinarios son esos artefactos que nos solucionan la vida. Un horno de microondas eleva la corriente de la toma de la pared de 230 volt a unos increíbles 3000 volt o más y, sin peligros, cocina un alimento en sólo un minuto o dos. Además, podemos presenciar el espectáculo a través de la ventanilla.

El componente clave es el magnetrón, refinado tubo de vacío que genera unas microondas lo bastante potentes para los radares militares (para los cuales fue desarrollado). En vez de una llama o una bobina eléctrica que caliente el alimento desde fuera, las microondas penetran en él y crean el calor en su interior.

Todavía queda quien desconfía de la técnica, pese a que los hornos de microondas están en el mercado desde los años cincuenta. El miedo habitual es: ¿no pueden las microondas atravesar la ventanilla y hacernos daño, sobre todo en los ojos? No. Las ondas se reflejan en un cedazo metálico incrustado en el vidrio. “Los orificios son mucho menores que la longitud de onda de la radiación, tanto que el cedazo actúa como un espejo metálico macizo”, señala Louis A. Bloomfield, profesor de física de la Universidad de Virginia.

Hace algunos años, los nutricionistas suscitaron la inquietud de que las microondas pudieran reducir los nutrientes de los alimentos. Los estudios muestran lo contrario. Todos los métodos de cocina destruyen vitaminas; la extensión del daño depende de la temperatura y del tiempo de cocción. La mayoría de las investigaciones revelan que los hornos de microondas producen unas temperaturas menos extremas y requieren menos tiempo de cocción que el estofado y el horneado.

Se cuestiona ahora si los hornos de microondas interfieren con las redes Wi-Fi. Un horno hermético no lo hará, porque de él no escapa radiación electromagnética. “Las transmisiones inalámbricas son sumamente sensibles a la radiación electromagnética”, dice Bloomfeld. “Nuestro cuerpo nunca notaría una fuga del orden de una parte en mil millones, pero una señal de Wi-Fi quizá sí la notaría.”



1. LAS MOLECULAS DE AGUA se hallan presentes en la mayoría de los alimentos. Poseen una carga eléctrica positiva en un “extremo” y una carga negativa en el otro. El campo eléctrico de una microonda orienta los extremos positivos en el mismo sentido. Al invertirse el campo 4900 millones de veces por segundo, las moléculas giran en uno y otro sentido; en sus giros, se golpean y producen rozamiento. La energía asociada a ese movimiento molecular corresponde al calor. Los recipientes cerámicos y de vidrio no contienen agua y, por ello, permanecen fríos, si bien la comida caliente los calienta por conducción.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **SOPLIDO:** El soplido que producen los hornos de microondas nada tiene que ver con el magnetrón, cuya frecuencia de resonancia es excesiva para el oído humano. El sonido se debe al ventilador que lanza aire al interior del magnetrón para enfriarlo.

➤ **ZUMBIDO:** Los hornos de microondas producen también un zumbido. Este procede del transformador, el diodo y el condensador, que vibran cuando elevan el voltaje de la corriente de 50 hertz que toman de la red doméstica.

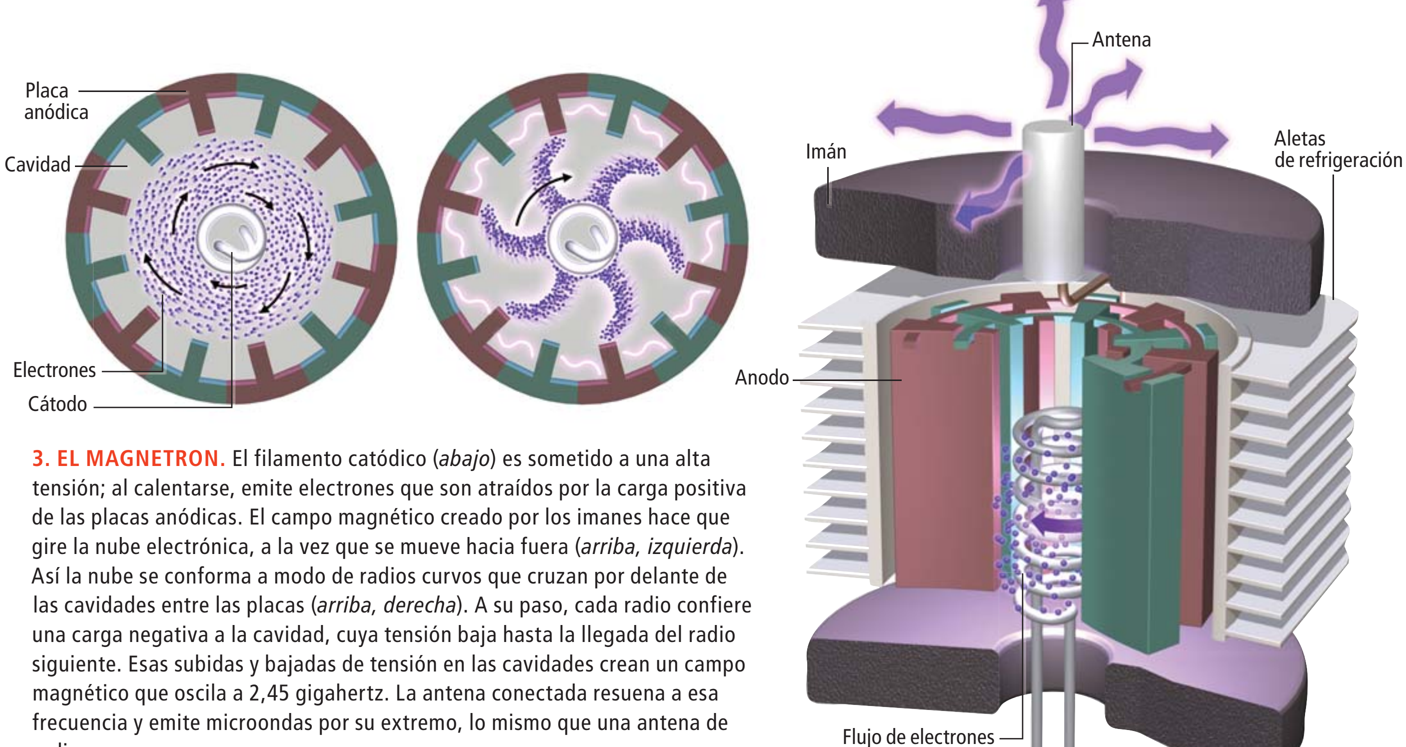
➤ **CHISPAS:** Pese a la creencia general, el metal no necesariamente genera chispas dentro de los microondas; de hecho, la cámara de cocción tiene las paredes metálicas. Lo importante es la forma. Las chispas se deben a la acumulación de partículas dotadas de carga eléctrica que de repente forman arco cuando se ven impulsadas por un voltaje que varía fuertemente a lo largo de una distancia muy corta. Una fuente metálica, redonda y plana, repartirá uniformemente la carga, lo que impedirá la acumulación de la misma; la bandeja de “tueste crujiente” que llevan algunas pizzas para microondas y el manguito que envuelve algunos alimentos (sándwiches) llevan un revestimiento metálico que se calienta mucho y dora la comida pero no produce chispas. Sin embargo, las formas más aguzadas, tales como los dientes de tenedor o las incontables pequeñas arrugas del papel de aluminio, concentran carga y crean caídas de tensión locales, que en conjunto provocan una descarga corona, una chispa.

➤ **DESCONGELAR:** Durante decenios, los hornos ejecutaban la función “descongelar” o cualquier otra de baja potencia mediante el simple encendido y apagado del magnetrón, de modo que éste generaba microondas de plena potencia sólo durante una parte del tiempo de cocción, un ciclo claramente audible. Algunos modelos nuevos cuentan con un modulador de ancho de pulso, un robusto circuito electrónico que reduce la alimentación del transformador, para disminuir la potencia de las microondas.

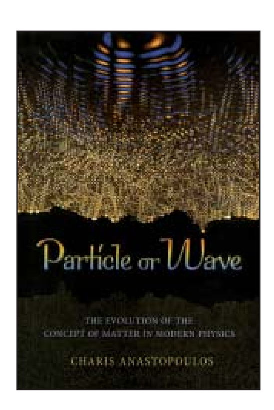
GEORGE RETSECK

Microondas
Ventilador
Guía de ondas
Antena
Magnetrón
Condensador
Diodo
Transformador

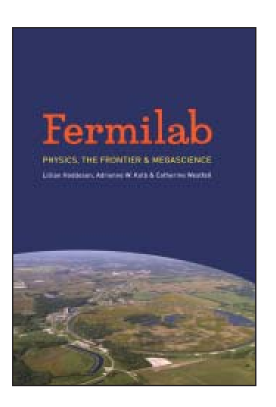
2. EL HORNO. Un transformador, un diodo y un condensador elevan la tensión de la red doméstica de 230 volt a 3000 volt o más; la portan, a través de un conductor, a un magnetrón. Este genera las microondas que una antena envía, a través de una guía de ondas, a la cámara de cocción, donde las ondas se reflejan en las paredes. Para uniformizar el calentamiento, una bandeja rota el alimento en el seno de las ondas. En los modelos sin bandeja rotatoria, una pequeña aleta giratoria (no se muestra) a la salida de la guía distribuye las microondas uniformemente.



3. EL MAGNETRON. El filamento catódico (*abajo*) es sometido a una alta tensión; al calentarse, emite electrones que son atraídos por la carga positiva de las placas anódicas. El campo magnético creado por los imanes hace que gire la nube electrónica, a la vez que se mueve hacia fuera (*arriba, izquierda*). Así la nube se conforma a modo de radios curvos que cruzan por delante de las cavidades entre las placas (*arriba, derecha*). A su paso, cada radio confiere una carga negativa a la cavidad, cuya tensión baja hasta la llegada del radio siguiente. Esas subidas y bajadas de tensión en las cavidades crean un campo magnético que oscila a 2,45 gigahertz. La antena conectada resuena a esa frecuencia y emite microondas por su extremo, lo mismo que una antena de radio.



PARTICLE OR WAVE. THE EVOLUTION OF THE CONCEPT OF MATTER IN MODERN PHYSICS,
por Charis Anastopoulos. Princeton University Press; Princeton, 2008.



FERMILAB. PHYSICS, THE FRONTIER, AND MEGASCIENCE,
por Lillian Hoddeson, Adrienne W. Kolb y Catherine Westfall. The University of Chicago Press; Chicago, 2008.

Materia

Teoría y experimentación en torno al concepto clave de la física

Entre los conceptos fundamentales del conocimiento humano sobresale preeminente el de materia. ¿A qué remite su significado? Con el tiempo se decantaron dos componentes últimos en liza, partícula y onda (*Particle or Wave. The Evolution of the Concept of Matter in Modern Physics*). Importa tanto su desentrañamiento, que se han construido máquinas gigantescas para arrancarle ese misterio a la naturaleza (*Fermilab. Physics, the Frontier, and Megascience*).

La primera reflexión sobre la materia coincide con la aparición del pensamiento filosófico, en la Grecia del siglo VII. Tales de Mileto irrumpe en escena declarando que todas las cosas están hechas de agua. Leucipo y Demócrito hablan de una materia constituida por piezas discretas e indivisibles, *átomos*, que se mueven en el vacío y generan, en su desenvolvimiento, los objetos y fenómenos que percibimos y el alma que no percibimos. Empedocles lidera la teoría de los cuatro elementos básicos, puros, que no pueden resolverse en otros más simples, aunque sí dividirse de manera indefinida. Cada elemento se caracteriza por una cualidad distintiva; la tierra toma su nombre de la propiedad de solidez, el agua de la fluidez, el aire de su naturaleza gaseosa y el fuego de su relación con el calor.

El cuadro presocrático se completa con la aportación de Pitágoras, para quien la materia se estructura sobre la proporción, número y figura. A esta interpretación geométrica se suma Platón. Los bloques constitutivos de la materia, propone, son triángulos, que se combinan consigo mismos compartiendo algunas de sus aristas y generando poliedros regulares. Cada uno de esos poliedros corresponde a un elemento: tetraedro (fuego), octaedro (aire), cubo (tierra) e icosaedro (agua). Aristóteles percibe que todas las cosas del mundo se encuentran en flujo constante. A la manera de la arcilla, los cuerpos pueden ser modulados y recibir formas dispares; poseen en sí mismos una potencialidad intrínseca. Y, si no interviene ningún agente externo, el cuerpo se comportará de acuerdo con su composición, dirigido siempre hacia su "lugar natural".

En el orto de la ciencia moderna, la reflexión astronómica de Copérnico, Kepler y Galileo motivó un replanteamiento general del concepto de naturaleza. Se tejen las grandes síntesis mecanicistas. Creía Descartes que su geometría analítica aportaba la clave para describir los movimientos de los cuerpos, en el bien entendido de que una cosa es material en tanto en cuanto es un cuerpo, es decir, ocupa un lugar en el espacio. No admitía la idea de espacio vacío. Materia es extensión. Leibniz asociaba el mundo natural a una máquina, cuyas partes, interconexas, operaban de acuerdo con unas reglas preestablecidas e inmutables.

Newton culmina la revolución científica al unir las "cosas de los cielos y las cosas de la tierra". Todas se encontraban sometidas a las mismas leyes, expresadas en un lenguaje matemático. La mecánica newtoniana, que mantiene la vieja teoría atómica de partículas que se mueven en el vacío, introduce el carácter absoluto e inmutable del espacio y el tiempo. Su tesis central, recogida en los *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, defiende que los cuerpos interaccionan entre sí al producir un cambio directo en sus aceleraciones. Y desgrana principios asociados. De acuerdo con su segunda ley del movimiento, la aceleración de la partícula es proporcional a la fuerza externa. La fuerza se ejerce desde un cuerpo físico sobre otro y se establecen pares de acción y reacción; tal es el contenido de la tercera ley. En ausencia de fuerzas, un cuerpo continúa en su estado natural de movimiento, un movimiento cuya velocidad es constante en una dirección determinada, propone la primera ley.

De las transformaciones de la materia se ocupaba la química. Georg Stahl avanzó la doctrina del *flogisto*, para explicar la combustión. Los materiales ricos en flogisto arden. En ese proceso, el flogisto escapa al medio y deja tras de sí un montón informe de cenizas. La teoría del flogisto prendió. No comenzó a abandonarse hasta que los químicos se percataron de que los fenómenos de combustión guardaban relación con la presencia de cierto gas. Priestley aisló ese gas, el oxígeno. El golpe definitivo contra la teoría del flogisto se lo debemos a Lavoisier y su famoso experimento: al quemar una sustancia metálica, las cenizas resultantes pesan más que la sustancia original (se suponía que el flogisto abandonaba los metales durante la combustión y, por consiguiente, las cenizas pesarían menos que el metal original).

¿Podían explicarse los fenómenos químicos mediante los conceptos físicos de la mecánica? Dalton se empeñó en unificar los conceptos de la mecánica newtoniana y los nuevos descubrimientos de la química. Mayer y Prescott Joule convergieron en defender la interrelación entre calor (esencial en química) y fuerza mecánica. Helmholz dio un paso más y propuso que todas las fuerzas eran manifestaciones de una sola magnitud física. La elaboración de la teoría cinética condujo a la conclusión de que los fenómenos térmicos podían reducirse, casi por entero, a la mecánica newtoniana, cuando esas leyes se aplican al nivel de movimiento molecu-

lar. La teoría que explicita esa reducción era la mecánica estadística, desarrollada por Boltzmann y Gibbs.

Desde que Oersted observó que la brújula respondía a la presencia de un cable cargado y, sobre todo, desde los trabajos de Faraday, en física moderna nada es inteligible sino es a través de la luz del electromagnetismo. En "On Faraday's Lines of Force", Maxwell aportaba un lenguaje matemático para las líneas de fuerza eléctricas y magnéticas. En el desarrollo de las ideas de Maxwell desempeñó un papel determinante el concepto de energía, recién introducido en el estudio de los fenómenos térmicos. ¿Qué función cumplía la energía en los fenómenos eléctricos y magnéticos? En múltiples experimentos se había demostrado la transformación de calor y energía mecánica en energía eléctrica y magnética. ¿Dónde quedaba almacenada esa energía? Maxwell no dudó: en el campo. Encontró leyes del movimiento para los campos y advirtió de la profunda imbricación de los campos eléctricos y magnéticos. Las ecuaciones de Maxwell predicen que los campos eléctricos y magnéticos se propagan por el espacio en forma de ondas. Hertz detectó ondas electromagnéticas de muy baja frecuencia y verificó que sus propiedades eran parecidas a las de la luz.

El principio de energía junto con las teorías del electromagnetismo y la mecánica estadística parecían haber dado cumplimiento a los sueños de una ciencia matemática que describiera todos los aspectos del mundo físico. Sólo quedaban flecos de relevancia menor, opinaba William Thomson. Pero nada más lejos de la verdad. El mundo estaba en puertas de dos grandes revoluciones: la relatividad y la mecánica cuántica.

La teoría de la relatividad nació del electromagnetismo. Creíase que los campos electromagnéticos se propagaban por el éter, medio cuya distribución en el espacio debía ser homogénea porque las ecuaciones de Maxwell no se referían a ningún punto o dirección privilegiada. Einstein muestra en 1905 que la luz se mueve a la misma velocidad en todas las direcciones, cualquiera que sea el movimiento de la Tierra; resultan irrelevantes el éter y las ideas de espacio y tiempo absolutos. En su nueva teoría, las longitudes y los intervalos de tiempo medidos eran *relativos* con respecto al marco de referencia inercial empleado en la medición. Si el espacio y el tiempo no eran absolutos por sí mismos, se convertían en absolutos cuando se unían y formaban el *espaciotiempo*. La teoría especial de la relatividad constituía una reformulación de la teoría de Newton, no una revolución. Pero en la relatividad general, donde se incluyen también los fenómenos gravitatorios, el espaciotiempo pierde su carácter absoluto.

De los aledaños de la mecánica estadística y del electromagnetismo procedía el instrumento letal contra la mecánica newtoniana, la radiación de *cuerpo negro*. El cuerpo negro constituía un sistema ideal para el estudio de la relación entre fenómenos electromagnéticos y fenómenos térmicos. Los resultados de la medición de la radiación de cuerpo negro trajeron una sorpresa inesperada. Planck postuló que un cuerpo negro no emite radiación continua, sino en paquetes discretos. Existe un valor mínimo de energía, un *quantum*. No todos los *quanta* son iguales. Divergen en razón de la frecuencia de onda correspondiente. Con mayor exactitud, la energía de un cuanto es proporcional a la frecuencia de onda.

Einstein admitió la acción de los cuantos de luz y los llamó fotones. Otra partícula, el electrón, constituía un objeto intrigante. Su método de generación, así como el efecto fotoeléctrico, lo situaba en la composición del átomo. Si el electrón forma parte de la constitución interna del átomo, otras partículas con carga opuesta deberán estar presentes también, de suerte que la carga total sea cero. Rutherford demostró la existencia de una región donde se alojaba buena parte de la masa del átomo, el *núcleo*, que, además, tenía que portar carga positiva para que repeliera con violencia las partículas alfa.

A la teoría cuántica de Planck y al modelo atómico de Rutherford, Bohr agregó la información recabada de la *espectroscopía*, el estudio de la radiación electromagnética emitida por los cuerpos. De acuerdo con la hipótesis de los cuantos, la frecuencia de una onda electromagnética corresponde a la energía transportada por cada fotón. Bohr estudió el átomo de hidrógeno, que cuenta con sólo un electrón y ratificó el modelo atómico de Rutherford, dio explicación a las observaciones espectroscópicas y convirtió en centro de atención de la física la naturaleza del mundo cuántico.

De inmediato la física se esforzó por extender las aportaciones de Planck, Einstein y Bohr a otros sistemas físicos más complejos. La identificación del espín de la partícula y la existencia de la estadística cuántica revelaron propiedades cruciales. El éxito del modelo cuántico de Rutherford-Bohr del átomo posibilitó una explicación de las propiedades químicas de los átomos en términos de órbitas cuánticas de los electrones. El número de electrones en un átomo se identificó con el número atómico, que determinaba las propiedades químicas de los elementos de acuerdo con la tabla periódica de Mendeleiev. Se dio otro paso importante en la teoría cuántica cuando se zanjó el problema de la dualidad onda-partícula con el famoso experimento de la doble rendija.

En 1925 Heisenberg postuló que debíamos formular la física en términos de cantidades que remitan a magnitudes físicas observables. Pero, ¿qué observamos en física atómica? Nuestra única información procede de la radiación electromagnética, a saber, los fotones que son emitidos por los átomos. En el modelo de Bohr damos por supuesto que los fotones surgen en las transiciones de electrones entre dos órbitas permitidas. Toda la información que obtenemos de tales sistemas se refiere a dichas transiciones, a esos saltos cuánticos. Puesto que cada órbita puede caracterizarse por un entero, una transición se caracterizará por un par de tales enteros. Si tomamos en consideración las transiciones que corresponden a todos los pares posibles de enteros, formamos una matriz. Born y Jordan pusieron las ideas de Heisenberg sobre una firme base matemática. La nueva mecánica se denominó mecánica de matrices.

Schrödinger, en línea con De Broglie, especuló si las partículas se comportaban como ondas. Formuló una ecuación, que describía su movimiento. Esa gavilla de aportaciones supuso la creación del marco de una nueva física, uno de cuyos principales retos lo tenía en el tratamiento mecánico cuántico del campo electromagnético. Dirac añadió que los estados de energía positiva correspondían sólo a las partículas físicas, las únicas que observamos y con las que interaccionamos. Los estados de energía negativa no se manifiestan a sí mismos en la realidad, sino que forman una suerte de fondo o mar donde se originarían las partículas. Tal hipótesis suponía una distinción tajante entre los estados de energía positiva y los estados de energía negativa; los primeros se encuentran en su mayoría

desocupados y corresponden a las partículas que observamos; los segundos están siempre ocupados y son inaccesibles a la observación. Apoyaba la distinción entre partículas y antipartículas en una noción interna del tiempo.

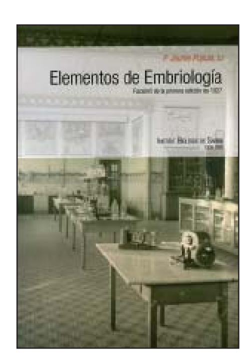
Para someter a contrastación empírica ideas tan novedosas se requerían herramientas no menos ambiciosas que sacaran a la luz los componentes últimos de la materia. La máquina prodigiosa se llamó ciclotrón, inventado en 1929 por Ernest Lawrence. En ese primer acelerador de partículas, los iones ligeros positivos rotaban en espiral hacia fuera en un campo magnético constante, aumentando gradualmente su radio por la acción de un campo eléctrico alternante y de frecuencia constante. En sus sucesores, los sincrotrones, inventados por Veksler en 1944 y por McMillan en 1945, se mantenía constante el radio circular de las partículas. Tras el sincrotrón, importante fue el principio de gradiente alternante, desarrollado en 1952 por Courant, Livingston y Snyder. En 1959 entró en funcionamiento el sincrotrón de protones del CERN en Ginebra y, en 1960, el sincrotrón de gradiente alternante del Laboratorio Nacional Brookhaven en Long Island.

Con la creación del Fermilab se buscaba superar de lejos la barrera de energía situada entonces en los 33 GeV del Brookhaven; en 28 GeV se situaba la frontera del CERN. Establecido en 1967 bajo el amparo de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos, Robert R. Wilson fue su primer director-fundador. Toda la vida profesional de Wilson estuvo ligada al ciclotrón, que conoció en Berkeley en su juventud y al que consagró la tesis doctoral. Le sirvió para participar en la demostración, por Fermi y Anderson, de la primera reacción en cadena.

En su arranque, las infraestructuras experimentales del Fermilab se repartieron en cuatro áreas experimentales básicas: el área blanco interna (sección recta CZero del anillo principal), más tres áreas externas alimentadas por líneas de haz (el área de neutrinos, el área de mesones y el área de protones). Cada una realizaba experimentos específicos: dispersión protón-protón, búsqueda de quarks y monopolos, mediciones de secciones eficaces, dispersión elástica e inelástica, interacciones entre neutrinos, rayos cósmicos, etcétera. Fue en el área de protones donde se descubrió el quark belleza, uno de los seis del modelo estándar.

A Wilson le sucedió Leon Max Lederman, quien puso en marcha el segundo anillo y abrió el dominio de energía a los billones de electronvolt (TeV). Bajo la dirección de Lederman, el Fermilab entró en la era de la megaciencia, con programas de investigación a largo plazo. Se construyeron dos detectores para analizar las colisiones. El nombre de Lederman va asociado al descubrimiento del mesón K neutro y a la existencia de dos tipos diferentes de neutrinos, relacionado uno con el muon y otro con el electrón.

Luis Alonso



ELEMENTOS DE EMBRIOLOGIA DEL HOMBRE Y DEMAS VERTEBRADOS,

por P. Jaume Pujiula. Instituto Químico de Sarriá; Barcelona, 2007.

Embriología ilustrada

Pujiula culminó su labor pedagógica con la publicación de importantes obras

Con motivo del centenario de la creación del Instituto Biológico de Sarriá (1908) y de la inauguración de un departamento de biotecnología en el Instituto Químico de Sarriá a finales de 2007, se publicó una versión facsímil de una de las obras más celebradas del Padre Jaume Pujiula: *Elementos de embriología del hombre y demás vertebrados* (1927).

Jaume Pujiula (1869-1958), tras una dilatada formación en histología y embriología en diversos centros austriacos, fundó en 1908 en Roquetas el Laboratorio Biológico del Ebro. Se denominó así para distinguirlo del Laboratorio Químico, fundado en 1905. Ambos centros de investigación compartieron edificio; en 1916 se trasladaron a Barcelona. Allí ejercieron el magisterio en ambas disciplinas y fueron a la vez centros de gestación de numerosas tesis doctorales.

Pujiula bordó su labor pedagógica mediante cursos prácticos intensivos de histología vegetal y animal, así como de embriología. Culminó su magisterio con la edición de diversos textos, entre los cuales destacan *Citología: parte teórica y práctica* (1928) y *El vegetal a través del microscopio* (1956). Asimismo, fue coautor de tres de los cuatro tomos de la magna obra dirigida por Joaquín M.ª de Barnola, el *Tratado completo de Biología Moderna*. El tercer tomo se centra en la *Embriología general; Anatomía, Fisiología e Higiene humanas* (1926). Muchas de sus obras tuvieron tres y cuatro reediciones. Pero fue sin duda su *Embriología del hombre y demás vertebrados* la más completa y novedosa en el ámbito de la ciencia española.

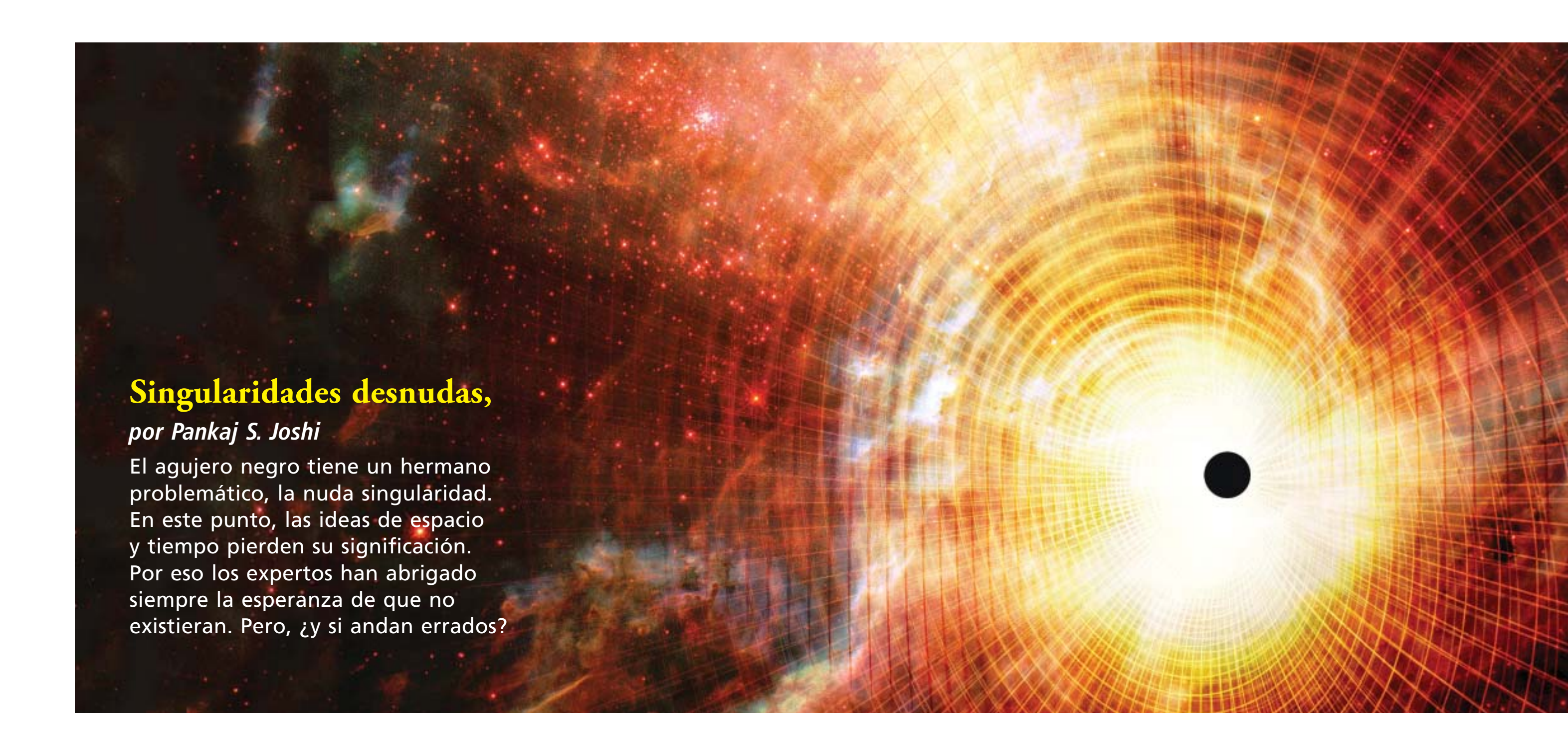
Se editó en 1922 con prólogo de Pedro Nubiola, catedrático de obstetricia de la facultad de medicina de la Universidad de Barcelona.

En 1927 publica los *Elementos de embriología del hombre y demás vertebrados*, abreviación de la anterior. Al tratarse de una obra dirigida sobre todo a estudiantes de anatomía, no realiza un análisis exhaustivo de las etapas de la embriogénesis. A la claridad expositiva del texto se añade una rigurosa iconografía en la que se perfilan con toda nitidez los elementos anatómicos que se van originando, a lo largo del desarrollo embrionario, a partir de las tres hojas blastodérmicas. Para los dibujos cuenta con la colaboración de su discípulo Luis Roca.

Tras un esbozo de la oogénesis y la espermatogénesis, se detallan la fecundación y las primeras etapas de la formación del embrión y de sus cubiertas. Si bien es cierto que la terminología actual está más diversificada (incorpora los conocimientos aportados por la microscopía electrónica), la nomenclatura básica continúa siendo la clásica. Una selección iconográfica nos aporta los caracteres diferenciales de la segmentación de los diversos tipos de ovocitos maduros (huevos) que hallamos en la escala zoológica. Destaca el capítulo de la formación de los órganos de los sentidos, en particular el ojo.

Mercè Durfort

EN EL PROXIMO NUMERO DE ABRIL 2009



Singularidades desnudas,

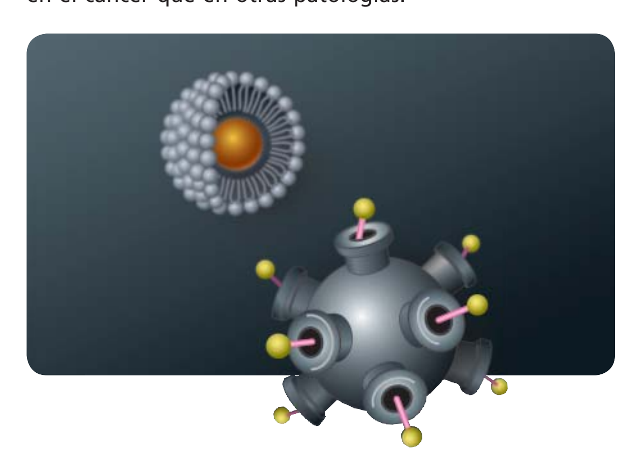
por Pankaj S. Joshi

El agujero negro tiene un hermano problemático, la nuda singularidad. En este punto, las ideas de espacio y tiempo pierden su significación. Por eso los expertos han abrigado siempre la esperanza de que no existieran. Pero, ¿y si andan errados?

Nanomedicina contra el cáncer,

por James R. Heath, Mark E. Davis y Leroy Hood

Si asociamos el organismo humano a un sistema de redes moleculares, los médicos podrían, en algún momento, abordar los puntos conflictivos con técnicas nanométricas, lo mismo en el cáncer que en otras patologías.



Morfología del cerebro,

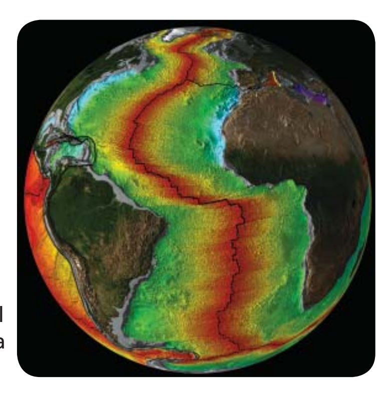
por Claus C. Hilgetag y Helen Barbas

Poco a poco comienzan a conocerse los pormenores del proceso de formación de las circunvoluciones cerebrales. Al ahondar en esa línea de investigación, esperan los clínicos, podrá mejorarse en el diagnóstico y en el tratamiento del autismo, la esquizofrenia y otros trastornos mentales.

Origen de la corteza oceánica,

por Peter B. Kelemen

Las profundas cuencas oceánicas se hallan cubiertas por lava que emergió de volcanes submarinos y solidificó. Empieza a comprenderse el modo en que esa lava llega hasta el lecho marino.



El movimiento de las proteínas,

por Oscar Millet

La espectroscopía de RMN arroja luz sobre la compleja dinámica de las proteínas. Revela una estrecha relación entre la flexibilidad molecular y la función biológica.

